النسبية

من نيوتن ... إلى أينشتين

الدكتور
مرسيل واغر

دار اليقظة العربية
للتأليف والترجمة والنشر

وزارة الثقافة والارشاد القومي

مديرية التأليف والترجمة

النسبية

من نيوتن ... إلى أنشتين

الدكتور

مرسيل داغر

سلسلة تبسيط العلوم

٣

النسبية ـ من نيوتن ... الى انشتين

تقديم الكتاب

قبيل الحرب العالمية الثانية لم يكن الجدل حول نظرية اينشتين قد انتهى بعد وان تكن معالم المعركة قد توضحت وكنت أتتبع في المجلات العلمية سيرها فأتحمس تارة لاينشتين وأنصاره وتارة لمعارضيه ، ولم أكن في هذه المعركة الا كالمتفرج على مباراة لا يبغي منها الا أن تنتهي وتنتهي بانتصار أي من الفريقين لا فرق عنده ان يكون هذا أو ذاك . ولكن المباراة كانت شيقة فعلا وعلى المستوى الرفيع اشترك فيها علماء كبار أعرف منهم استاذنا لمادة الميكانيك في مدرسة السنترال في باريس وبواسطته كنا نتتبع الجدل القائم وخاصة آراء المعارضين من جميع أطراف الارض لأن كان الاستاذ المذكور واحدا منهم . فكانت هذه الفرصة النادرة سببا لكي أقرأ ما فيه الكفاية حول هذه النظرية من كتب ونشرات مبسطة لها أو عويصة تناولت جوهر الموضوع من الناحيـة الرياضية او الفلسفية .

واندلعت الحرب العالمية الثانية بويلاتها ، وكان يبدو ان العالم انشغل بها عن سواها . وما أن وضعت الحرب أوزارها وأعلنت نهايتها بالقاء القنابل الذرية على هيروشيما وناغازاكي الا وتبين انه كان لنظرية اينشتين نفسها الشأن الاكبر في أبحاث الذرة ، وكتب لهذه النظريـة البسيطة المعقدة في آن واحد النصر الاخير وخفتت أصوات المعارضين وان كنا لا زلنا حتى يومنا هذا نسمع بين حين وآخر صوتا يرتفـع هنا أو هناك .

وفهم نظرية اينشتين التي سماها « النظرية النسبية » يتطلب معرفة عالية من مستوى الاختصاص الجامعي الرفيع في الرياضيات • وقد كان يشاع ، في أيامنا تلك ، أن أربعين عالما فقط عـلى وجه الارض يفهمون وحدهم نظرية النسبية كما كنا نسمع أن الحكومة الالمانية وضعت تحت تصرف اينشتين أربعين حاسبا من أصحاب الاختصاص في الرياضيات (ولم تكن الآلات الحاسبة الالكترونية معروفة بعد) حتى تمكن من انجاز حسابات نظريته وتطبيقاتها • وسواء أصحت هـذه الاشاعات أو لم تصح فان مضمونها يدل على شيء وحيد هو : ان هذه النظرية عويصة وفهمها كاملة يستعصي حتى على المختصين أحيانا •

نعم انها لكذلك ولكنها مع ذلك ليست اعجازا وخاصة اذا كان الشارح لها متملكا لمضمونها وأحسن عرضها •

وقد قرأت الكتاب الذي يضعه اليوم الاستاذ الدكتور مارسيل داغر بين أيدي المثقفين العرب وقد تصدى به لشرح أهم النظريات العصرية التي أعطت للميكانيك والكهرباء والمغناطيس والضوء مفاهيم جديدة يخرج الانسان منها كأنه يعيش في عالم من الاحلام مع أنه هو الواقع على الاقل حسب هذه النظرية الجديدة التي أصبحت مقبولة عند فطاحل العلماء والفلاسفة •

فالطول ينقلص بفعل السرعة والزمن يتمدد كذلك بفعل السرعة ، وما هو حقيقة مبرمة بالنسبة لي لا يكون كذلك بالنسبة لك ، فكل شيء نسبي في هذا الكون •

ولا أريد أن أشرح كل شيء هنا بل يسرني أن أحيل القارىء الى ما حواه هذا السفر القيم حول نظرية النسبية • ولكن كل ما أريد أن أقوله عن يقين وليس على سبيل المجاملة لزميل ، هو أن كتاب الاستاذ الدكتور داغر هو من بين الكتب النادرة التي حاولت شرح هذه النظرية

ووفق مؤلفها لبلوغ هدفه بلغة سلسة وأفكار نيرة متعاقبة تعاقبا منطقيا فأعطى فكرة واضحة وكافية عن النظرية النسبية تفتتح الطريق لمن يريد أن يتعمق بها ويتخصص في تفاصيلها فيما بعد .

واني واثق أن القـارىء الكريم سيتحقق بنفسه صحة ما أقول وسأكسب ثقته كما كسبت ثقة الزميل العزيز الدكتور داغر اذ أفسح لي المجال في مؤلفه لتقديمه الى قرائه . فاليه شكري على هذه الثقة وشكري على ما قدمه للمكتبة العربية .

حلب ــ ١٩٦٣/٧/٣٠

خير الدين حقي
عميد كلية الهندسة
في جامعة حلب

* * *

مقدمة

نشر العالم الانكليزي اسحق نيوتن كتابه « المبادىء » عام ١٦٨٧ وتناول فيه شرح كافة المفاهيم الميكانيكية بلغة واضحة وسهلة • ورغم ذلك كله كان كلما مر هذا العالم في ردهات الجامعة تهامس الطلاب قائلين : هذا رجل كتب مؤلفا لم يتمكن من فهمه أحد حتى هو نفسه •

ونشر العالم الالماني البرت اينشتين نظريته النسبية الخاصة عام ١٩٠٥ ونظريته النسبية العامة عام ١٩١٦ • وفي عام ١٩٢١ زار الولايات المتحدة واستقبلته مدينة نيويورك استقبال الغزاة الفاتحين وكان أول سؤال وجه اليه هو : أصحيح أن الذين فهموا النظرية النسبية قلائل يعدون على أصابع اليد الواحدة ؟

ان طابع عدم الفهم هذا ليس اذا فقط من ميزات العلوم الحديثة بل يلصق بكل نظرية علميـــة جديدة تبرز للوجود وتحدث ثورة في الاوساط العلمية •

وصعوبة الفهم هــذه هي التي حالت دوما دون نشر النظريات العلمية وتبسيطها بغية تقريبها الى عقول الجمهور المتعطش دوما الى الاطلاع على تقــدم المعرفة • وهي التي جعلت العلماء الفيزيائيين ينكمشون في قفصهم الذهبي مبتعدين عن الجمهور محتفظين بعلمهم في دائرتهم الخاصة •

وكان من نتاج الحرب العالمية الثانية وانتشار الوسائل الدعائية الجديدة من راديو وتلفزيون وصحف ومجلات ما جعل الجمهور يلح في طلب الوقوف على تقدم المعرفة والاطلاع على أكبر قسط من المفاهيم

الفيزيائية الحديثة التي كانت الدافع الاساسي الى كبريات الاختراعات الجديدة كالقنبلة الذرية والصواريخ والآلات الالكترونية ... الخ .

وشعرت غالبية المؤسسات العلمية بأهمية تثقيف الجمهور وعملت جديا لمحاولة تبسيط العلم وجعله في متناول الكثرة من الشعب . وتبرع الصناعي الهندي الكبير باتنيك (Patnaik) لمنظمة الاونسكو بمبلغ سنوي قدره ١٠٠٠ جنيه استرليني تمنحها بدورها جائزة لاحسن مؤلف علمي ينشر كل عام في تبسيط العلوم .

ونال الجائزة علماء فطاحل برعوا في تبسيط العلم براعتهم في ابتكار النظريات الحديثة ونال العالم الفرنسي لويس دوبروي (Louis de Broglie) عام ١٩٥٢ جائزة الاونسكو كما نالها العالم الامريكي جورج غامو (George Gamow) عام ١٩٥٧ .

ولما كانت الغاية الاساسية من تبسيط العلم جعله في متناول العدد الاكبر من الناس لحثهم على حب المطالعة العلمية وجب لذلك عرض الموضوع بشكل مبسط واضح وبلغة سلسة مع شرح النتائج العلمية للموضوع واستعمالاتها اليومية .

وينبغي الانتباه أيضا الى تحاشي الخطأ كأن نعطي النتائج القيمة الكبرى متناسين غاية العلم الاساسية وهي التحري الدائم والدائب للحقيقة العلمية .

ويواجه العالم الفيزيائي المكلف بتبسيط العلم مسألة جد عويصة أصعب بكثير من المسائل اليومية التي يواجهها في مختبره ، فعليه أن يعرض أفكاره بلغة تختلف عن اللغة التي اعتادها في مناقشة زملائه وتلاميذه ، كما عليه أن ينتبه الى أن الاشياء الواضحة بالنسبة اليه يمكن أن تكون غامضة بالنسبة للآخرين .

والمسألة في شرقنا العربي أكثر صعوبة ، فالعوامل التاريخية بالاضافة الى الاستعمار الطويل قد جعلت جمهورنا ينكب على مطالعة المؤلفات الادبية والقصصية والتاريخية ووضعت شبابنا في معزل عن ركب الحضارة الحديثة حتى أصبحوا يعيشون على هامش أفكار هذا العصر .

وقد حان الوقت كي تشترك أجيالنا الصاعدة في وطننا الكبير في الثورة الفكرية الجامحة التي تجتاح البشرية في هذا الوقت .

وأخذت وزارة الثقافة والارشاد في القطر السوري على عاتقها القيام بهذه المهمة الشاقة والسامية وكلفت في العام الماضي المهندس الاستاذ وجيه السمان تأليف كتاب مبسط عن الصواريخ والاقمار الصناعية ونجح المؤلف في كتابه هذا الى أبعد حدود النجاح اذ عرض الموضوع بشكل سهل وشيق ومفيد .

وبلغت منذ أشهر تكليفي تأليف كتاب مبسط عن النظرية النسبية .

ولا شك أن تفهم الجمهور للنظرية النسبية سيساهم من ناحيته في فتح آفاق جديدة أمام شبابنا ، لما للنظرية النسبية من قواعد راسخة في كافة العلوم الحديثة .

فالنظرية النسبية في نظر العلم الحديث هي حجر الزاوية لكافة فروع العلم الحديث وتعتبر ثورة علمية قوضت باندلاعها كافة المفاهيم والمبادىء العلمية والفلسفية التي كانت قائمة قبلها واستبدلتها بمفاهيم ومبادىء جديدة .

وموضوعنا هذا موضوع علمي مجرد وجاف . وقد اطلعت قبل البدء بكتابة مؤلفي على عدد كبير جدا من الكتب المبسطة التي عالجت شرح النظرية النسبية ، ولاحظت أن غالبية المؤلفين ان لم أقل كلهم ابتعدوا كليا عن استعمال الرموز والمعادلات الرياضية حرصا منهم على

تبسيط ما يشرحون وأشك ان كان بامكان أحسن هذه المؤلفات اعطاء فكرة واضحة عن النسبية .

وأعتقد من جهتي أن ادخال قليل من الرياضيات قد يساعد على فهم النظرية النسبية . واللغة الرياضية هي أفضل لغة توضح بواسطتها الفكرة العلمية ، لذلك وجدت نفسي ألجأ الى قدر قليل من الرموز والمعادلات الرياضية يستطيع أن يتابعها بسهولة تامة كل من ملك الاسس الاولية لعلمي الجبر والهندسة .

وأنا لا أوجه كتابي هذا للعلماء كما لا أوجهه أيضا للذين ما زالوا حتى الآن يجهلون المبادىء الاساسية لعلمي الفيزياء والرياضيات .

وليس هذا الكتاب مؤلفا أدبيا أو رواية بوليسية وضعت ليطالعها القارىء خلال بضع دقائق قبل ذهابه للنوم فهو يتطلب من القارىء تركيز الانتباه وشحذ الذهن . وقد ضمنته عددا كبيرا من الامثلة المتنوعة المستقاة في غالبية الاحيان من الحياة اليومية ووضحت غالبيتها بأشكال بسيطة .

وقسمت هذا الكتاب الى بابين :

يضم الباب الاول شرحا مختصرا لاهم المبادىء الكلاسيكية في علمي الميكانيك والفيزياء ، وهي مفاهيم وجدتها ضرورية للقارىء حتى يتمكن من متابعة أفكار ونظريات اينشتين .

وضمنت الباب الثاني قسمين شرحت في القسم الاول أسس النظرية النسبية الخاصة مع عدد كبير من تطبيقاتها وقمت في القسم الثاني بجولة حول النسبية العامة وأشهر تطبيقاتها .

فاذا حقق مؤلفي هذا الغاية فذلك رجائي والله الموفق .

الدكتور مرسيل داغر
مدرس الميكانيك في كلية الهندسة
جامعة حلب

الباب الأول

الميكانيك الكلاسيكي

الفصل الأول

لمحة تاريخيـــة
في
تطور العلوم الفلكية والميكانيكية

قال الفيلسوف المعاصر برتراند رسل (Bertrand Russel) « لايذكر القرن العشرون الا ويـــذكر اينشتين (Einstein) ولا يذكر اينشتين الا ويذكر القرن العشرون » . وعليه كان على كل من رغب ، في فهم القرن العشرين ، أن يطلع على مدى قوة البنيان الذي أشاده اينشتين . ولا يمكن الوقوف على النظريات الحديثة الا بعد استعراض مسهب للعلوم الفيزيائية والرياضية وتأثيرها في هذه النظريات .

في الواقع يجد الباحث العلمي نفسه في مواجهة ثلاثة نماذج للكون وضع أولها العالم نيوتن (Newton) ووضع ثانيها وثالثها العالم اينشتين.

يسمّى الانموذج الثالث بالنظرية النسبية العامة وهو تعميم للانموذج الثاني المسمّى بالنظرية النسبية الخاصة .

ولا يمكن فهم النظرية النسبية العامة الا متى وقفنا على دقائـــق النظرية النسبية الخاصة . وتتلاشى كافة الصعوبات التي قد نصادفها في

النظرية النسبية العامة ؛ متى تمكنا من فك الخيوط التي تربط بين النظريتين ربطا محكما منطقيا •

والدوافع ، التي دفعت بالعالم اينشتين الى اعلان النظرية النسبية الخاصة ، تتصل اتصالا وثيقا بأبحاث معاصريه من جهة وبأبحاث الاقدمين من جهة أخرى • ولا يمكن فهم الآراء الجديدة الا متى وقفنا على ما سبقها من أبحاث ونظريات ، وخاصة ما أتى به العالم نيوتن الذي وضع في أواخر القرن السابع عشر القواعد الاساسية لعلمي الميكانيك والفلك •

يبنى العلم عرفا على عدد من المبادىء والموضوعات التي تقبلها دون برهان ، وتتوالى بعدها النظريات التي تستند على هذه المبادىء ، ومتى تحققت النتائج التجريبية لهذه النظريات ، اعتبر المبدأ صحيحا ، واذا ما حدث العكس عدّ المبدأ خاطئا أو تقريبيا أو ترك جانبا واستبدل بآخر أصلح منه وهكذا ••• وعدد المبادىء التي يبنى عليها الميكانيك الحديث قليلة جدا ، ورغم قلتها أوصلتنا الى نتائج رائعة فائقة الاهمية قلّ أن وجد مثيل لها في باقي العلوم •

واستنفد وضع مبادىء علم الميكانيك ، جهودا فكرية جمة وزمنا طويلا يربو على ألفي عام •

تطور علم الميكانيك :

نشأ علم الميكانيك منذ القدم ، ويعتبر مع علم الفلك من أقدم العلوم ، وتاريخ تطور العلمين تاريخ شيق مفيد ، يجدر بكل مطلع أن يقف على دقائقه •

كان الانسان البدائي يعتمد في الدرجة الاولى على قوته العضلية في درء مخاطر الطبيعة ، وفي سد حاجاته اليومية • ثم نشأت الحضارات ، واضطر الانسان المتحضر تدريجيا الى استخدام الآلة في أعماله اليومية

وحروبه وصيده ، ومن الطبيعي ان استخدام الآلة على هذا النحو لا بد وأن يكون قد دفع الانسان بشكل شعوري أو لا شعوري لطرح بعض المسائل الميكانيكية المتصلة بالآلة المستخدمة ، ولا بد تجاه ذلك من أن يكون قد وجد لها بعض الحلول التي اعتبرها آنذاك حلولا مناسبة •

قيل : « الحاجة ام الاختراع » والمخترع يصبح بالتالي عالما في مجاله . وقد شاهدت العصور القديمة علماء كثيرين عملوا على شحذ أذهانهم لحل بعض المسائل الميكانيكية المتعلقة بالآلات ، بغية ايجاد الحلول المناسبة لها •

ونشأ علم الفلك في بلاد ما بين النهرين وتوارثه الكلدانيون أبا عن جد • ونقله عنهم الاغريق وتفننوا في وضع اسسه واستنباط مبادئه ، حتى توصلوا في النتيجة الى اكتشاف أدق الطرق المؤدية الى صياغة القوانين الاساسية لعلم التحريك •

وبحث علم الميكانيك أول ما بحث في توازن الاجسام الصلبة الثقيلة وكان أول كتاب نشر في هذا الباب هو كتاب « المبادىء الاساسية لمركز الثقل والرافعة » للعالم اليوناني ارخميدس (٢٨٧ ــ ٢١٢ ق•م) (Archimède) • ويعتبر ارخميدس من أكبر عباقرة العصور القديمة • كانت أبحاثه كلها مبتكرة ، اعجب بها معاصروه ، وذاع صيته ووصلت أخباره الى مصر فاستدعاه ملك الاسكندرية هيرون (Heron) وأغدق عليه الهدايا والالقاب ، وكان لا يفتأ يردد : « لقد تغلب ارخميدس على كل معضلة حتى على كلمة مستحيل ، وبت أعتقد أن ارخميدس قادر على القيام بكل ما يدعى اليه » • ويجيبه ارخميدس : « أعطني مركز استناد وأنا كفيل برفع العالم » • سيطر ارخميدس سيطرة تامة على الآلة ، ويروى أنه تمكن من شد سفينة ، محملة بالبضائع ، من مرفأ الاسكندرية الى اليابسة ، بدون ان يبذل جهدا يذكر مكتفيا بتحريك بعض الحبال الملتفة حول عدد من البكرات •

كان الملك هيرون مولعا بالعلوم الفيزيائية ، وكانت ثقته بارخميدس ثقة عمياء ،وما اسطورة التاج الذهبي بغريبة عن سمع القارىء • طلب الملك من ارخميدس ان يفيده فيما اذا كان الصائغ قد استبدل الذهب الثمين او بعضه بمعدن آخر ، وأصر على عدم تلف التاج • واستعصت المعضلة على ارخميدس وأخذت عليه كل تفكيره ، وعندما لاحظ وهو يغتسل في مغطسه ان جسمه داخل الماء يبدو أخف مما هو عليه خارج المغطس ، قفز من مغطسه وخرج عاريا للشارع يصرخ « وجدتها ، وجدتها » لقد وجدها فعلا ، وجد ان الجسم المغمور في السائل يتعرض من قبل هذا السائل لقوة دافعة من الاسفل الى الاعلى تساوي وزن السائل المزاح • وبذلك تمكن ارخميدس من صياغة المبدأ الاساسي لعلم توازن السوائل •

تعد مؤلفات ارخميدس انموذجا في وضوح التعبير وفصاحة اللغة يشعر القارىء وهو يطالعها بعبقرية كاتبها ، وبجرأته النادرة في مقارعة أفكار معاصريه • لقد ثار ارخميدس على تعاليم عصره وانتقد الاساليب العلمية المتبعة التي فرضتها مدرسة ارسطو • ولن نتمكن من اعطاء ارخميدس حق قدره الا متى عرضنا على القارىء موجزا للتعاليم المدرسية التي نادى بها ارسطو وأتباعه •

في القرن الخامس قبل الميلاد ، بدأت أنظار العلماء والفلاسفة الاغريق تتوجه نحو الطبيعة محاولة تعليل ظواهرها بقياسها على سلوك الانسان والحيوان • وتوصل الفيلسوف سقراط في آخر المطاف الى ان المفاهيم العلمية الحقيقية بعيدة المنال ، ولا فائدة ترجى من دراستها واضاعة الوقت الثمين في التعمق في ظواهرها ، فالكون بما فيه من جماد وحيوان هو من صنع الآلهة وغايته الاولى والاخيرة اسعاد الانسان • وأسس سقراط مدرسة كان من أنجب تلامذتها أفلاطون الذي امتاز على أقرانه

بعمق تفكيره الرياضي ، ونادى ، بمبدأ الافضل : « تقدم الاكمل على الاقل كمالا ، أفضلية الصورة الدائرية على غيرها من السطوح والصور الكروية على غيرها من الحجوم ، أفضلية ما هو فوق على ما هو تحت، ما هو على اليمين على ما هو على اليسار ، ما هو أمام على ما هو وراء الخ ... » ولم يخرج أفلاطون على تعاليم استاذه فيما يختص بالطبيعة ، ونادى بعدم جدوى دراستها ، لانها مسيرة لا مخيرة . تسيرها قـوى جبارة لا يقيدها أي مبدأ أو قانون . وعوضا عن الاستعانة بالحواس لدراسة تركيب الكون ، يمكن أن نبني بأنفسنا عالما « يمثل فيه الخير والجمال المركز المرموق » .

وفي عام ٣٨٤ ق.م بزغ نجم ارسطو الذي كان بدوره من أنجب تلامذة أفلاطون ، وما لبث أن انشق عن المدرسة ، وعين استاذا للاسكندر الكبير . فساعده مركزه المرموق هذا على استلام أرفع المقامات العلمية ، فاكتسب نفوذا قلّ ان خص به عالـم من قبله . وعندما بدأ أرسطو في نشر أفكاره كانت العلوم قد أخذت في التفرع وبدأت العلوم الفيزيائية والرياضية بالانفصال عن الفلسفة مما دعا الى وجود أول فوج من العلماء المختصين ، منهم من اختص بعلم الفلك وترك الشعر جانبا ، وفريق آخر اهتم بالهندسة وترك الطب ، وانصرف الموسيقيون الى موسيقاهم . وساعد هذا الجو على ولادة أول جامعة في العالم وكان مؤسسهـا هو أرسطو الذي نصب نفسه استاذا لمختلف العلوم في كافة الكليات . ولما تقدمت به المعرفة أخذ بتجميع ما تبعثر من الوقائع الجزئية ، ذلك بغية التخلص من الفوضى العلمية الموروثة . ولم تمض سنوات معدودات حتى انتجت الجامعة أول موسوعة علمية ، حوت على مختلف أبواب العلم ، بدءا من المنطق الصرف الى علم الحيوان مارة بالفلك والفيزياء والهندسة ..

كان ارسطو استاذا ناجحا يدرس كل شيء ، فكان عليـه بالتالي

ان يجيب على كل سؤال أياً كان نوعه . الا انه كان معتدا بنفسه ينتقد معاصريه واساتذته نقدا لاذعا وكان في رأيه : « ان رائد العالم ، في وضع أسس علم من العلوم ، أن يبتعد عن ملاحظة العالم الخارجي ، لان الحواس غشاشة ، ويتحتم عليه أن يبتكر أسس العلم بالاعتماد على المناقشةالفكريةفقط ، وان يعلل الظواهر الطبيعيةبقياسهاعلى سلوك الانسان والحيوان . فالطبيعة انسان أكبر له خصائص الانسان الاصغر وارادته وغاياته ، وهناك تعليل لكل ظاهرة طبيعية ، و لا يكتنف الطبيعة أي غموض ، وكل شيء فيها واضح .

وكان أرسطو جاهلا للعلوم الرياضية ، لذا أتت مناقشاته الفكرية ضعيفة هزيلة في بعض الاحيان ، وكانت تشوبها الافكار الميتافيزيكية . كان يصف حركات الاجرام السماوية بذات العبارات التي يصف بها أفعال المخلوقات الحية ، فكما ان الكائن الحي يتجه الى غاية يسعى للوصول اليها ، فكذلك تفعل المادة الجامدة .

فاذا ما سأله سائل : لماذا يصيب السهم صدر الجندي ؟ أجابه على الفور وبكل بساطة : لان المكان الطبيعي لهذا السهم هو صدر الجندي العدو . واذا سئل لماذا تسقط الاجسام الثقيلة على الارض ؟ أجاب : تسقط هذه الاجسام على الارض ، لتحتل مكانها الطبيعي ، كالفأر يبحث عن حفرة يختبيء فيها . وكذلك النار تصعد الى اعلى لتنطلق الى عالمها الطبيعي وهو عالم الافلاك ، كالنسر يأوي الى عشه في اعالي الجبال .

فكل جسم اذا ترك وشأنه يفتش عن مكانه الطبيعي . الاجسام الثقيلة تسقط مسرعة نحو الارض وتزداد سرعة سقوطها بقدر ما يكون وزنها بينما تسقط الاجسام الخفيفة ببطء آسفة مجبرة . ويتحرك الجسم اذا أثرنا عليه بقوة ويقف بزوال القوة المؤثرة أو يدور حركة

دائـرية منتظمة . واذا سأله سائـل : كيف يمكن اذاً للسهـم أن يتابع طريقه بعد زوال قوة اليد الدافعة له ؟ أجاب : يتابع السهم طريقة بتأثير دفع الهواء له . اذ انه عندما يخترق السهم الهواء ، يحدث فيه فجوة ، وبعودة الهواء الى شكله الطبيعي وغلقه الفجوة المحدثة ، تنشأ فيه قوى تعمل على تغذية حركة اندفاع السهم الى الامام .

تلخص الامثلة التي أوردتها وكثير غيرها نظرة أرسطو للكون . وانكر ارسطو صلاحية التجارب في المساعدة على وضع أسس العلم ، لان حواسنا هي التي تتكفـل في نقل نتائـج التجريب ، والحواس غشاشة ، معرضة للخطأ . في حين لا يخطىء التفكير والمناقشة السليمة .

تبدو لنا اليوم أفكار أرسطو غريبة ، ولعل الاغرب منها كونهـا سيطرت وسادت ما ينوف على عشرين قرن ، وانتشرت في بلاد اليونان وتناقلها العرب فنقلوها بدورهم الى المشرق والمغرب وبقيت هي المفاهيم الوحيدة المسيرة للعلم طيلة فترة القرون الوسطى .

ورغم سيطرتها وجبروت الداعين اليها ، وجدنا ارخميدس يجرأ على معارضتها ويتخذ لنفسه اسلوبا في التفكير مغايرا لها . لقد اتجه ارخميدس بكليته الى ملاحظة الظواهر الطبيعية وضمن مؤلفاته قواعد عامة للتجريب اعتبرها معاصروه كفرا في العلم والحادا ما بعده الحاد .

وقتل ارخميدس ، فذهب ضحية الواجب العلمي ، اذ طعنه جندي عدو بينما كان يرسم ، على رمال الشاطىء ، شكلا هندسيا أخذ عليه كل تفكيره وانتباهه . واطفئت بقتله ، شعلة العلم المتوقدة ، التي اشعلهـا بغية انارة طريق المعرفة الحقة للاجيال الصاعدة . لقد حلق ارخميدس عاليا فوق معاصريه ، وكانت مؤلفاته سابقة لعصره بألفي عام على أقل تقدير ، حتى عد كاتبها الاب المباشر لنيوتن . ولو أمكن لمعاصريه فهمه لانتشرت العلوم الرياضية والفيزيائية منذ القرن الثالث قبل الميـلاد

ورسخت قواعدها دون ان تنتظر عالما مثل غاليله (Galilé) ليوقظهـا من سباتها العميق في القرن السابع عشر بعد الميلاد ، وليمهد الطريق من بعده لعبقرية نيوتن واينشتين حتى يضعا الاسس النهائية والمبادىء الحالية للعلوم الميكانيكية والفيزيائية •

تطور علم الفلك :

ذكرنا فيما سبـق أن علم الفلك لعب دورا أساسيافي الوصـول الى مبادىء علم التحريك في الميكانيك ، لذلك لا بد لنا عند دراسة تطور علم الميكانيك من استعراض مقتضب لتطور علم الفلك •

بينا كيف كانت آراء أرسطو تحول دون اي تقدم علمي يذكر نظرا لانكارها فوائد التجريب والملاحظة المباشرة للظواهر الطبيعية • وقد نجا علم الفلك من سيطرة الافكار المدرسية اذ كان لا بد ، في تحديد قواعده الاساسية ، من ملاحظة السماء ومراقبة حركة الاجرام السماوية•

نشأ علم الفلك في بلاد ما بين النهرين ، ونقله عنهم الفراعنة وبرعوا في وضع أسسه حتى بات العلم الوحيد الواضح المعالم الذي عرفـه الاقدمون • وبنشوء الحضارة الاغريقية كان أول علم اغرم به الفلاسفة اليونان هو علم الفلك • وعرفت الحضارة اليونانية عددا كبيرا من عباقرة هذا العلم ، تضاربت أبحاثهم ومبادئها وأتت نظرياتهم متعددة مبعثرة لترافق كل واحدة منها تقريبا ظاهرة فلكية معينة •

وفي هذه الحقبة بالذات بزغ نجم العالم بطليموس (٢٦٤ — ١٦٨ ق•م) (Ptolémé) وأخذ هذا الشاب على عاتقه تنظيم علم الفلك فعاد الى أبحاث الاقدمين وانتقى منها بعض النظريات التي وجدها منطقية • وكانت نظرته للكون تلخص بما يلي :

« الارض جرم ثابت يقع في مركز الكون وتدور من حوله الشمس والقمر والنجوم ••• » •

وتمكن بطليموس بالاستناد الى النظريات المختارة من وضع الاسس والقواعد الرياضية التي سمحت له بحساب بعد الكواكب عن الارض . فوجد ان القمر يبعد عن الارض مسافة تعادل ٣٨٥٠٠٠ كيلومتر وهو عدد قريب من العدد المعروف اليوم . الا انه أخطأ في تقدير بعد الشمس عن الارض خطأ فادحا . ولم ينجم خطأه عن تقدير في الحساب وانما عن خطأ مبدئي لان نظرية بطليموس في الكون هي بعرف علماء اليوم نظرية خاطئة . وبالرغم من ذلك لا نملك الا الاعتراف له بفضل كبير على علم الفلك لانه ساعد في تنظيم واستقرار هذا العلم ، نعم كان تنظيمه خاطئا الا ان التنظيم في العلم أجدى بكثير من الفوضى ، حتى ولو كان هذا التنظيم خاطئا .

وبقيت نظرية بطليموس سائدة طيلة قرون عديدة . أي منذ القرن الثاني قبل الميلاد حتى اواخر القرن الخامس عشر بعده ، وتبناها الفلاسفة والعلماء المدرسيون وأصبحت من ضمن المعتقدات التقليدية التي لا يتجرأ أحد على مسها أو نقدها .

ولكن لكل ظالم جولة ثم يزول مهما طغى واستبد ، وكذلك تزول كل فكرة خاطئة مهما سيطرت وطغت . وفي أواخر القرن الخامس عشر ولد العالم كوبرنيك (Copernick) وكانت ولادته في اوائل عصر النهضة. في عصر بدأت فيه المناقشة العلمية المركزة تعمل على تحطيم التقاليد المدرسية الموروثة . انضم كوبرنيك الى فئة غير قليلة من العلماء وكان همها الوحيد تقويض دعائم الافكار المدرسية ومن يساندها من رجال الدين والحكام والمتنفذين ، وطبقت بحق هؤلاء « الزنادقة » كما اسمتهم السلطات اقسى انواع الشدة والارهاب والتعذيب ، فاقصي منهم من أقصي وحرق منهم من احرق ولكن لم يلن لهم عود بل ثابروا على فضح التعاليم البالية وعملوا على استبدالها باخرى اصلح منها واجدى .

ولد كوبرنيك عام ١٤٧٣ في مدينة ثورن (Thorn) في بولونيا بعيدا عن حمى النقاش العلمي وسيطرة الكنيسة ، الا انه ما لبث ان اوفده عمه الى ايطاليا ، مهد العلم ، ليتمم دراساته الكهنوتية ، وهناك في ايطاليا انخرط كوبرنيك في صفوف المعارضين وعاش في خضم المعارك الفكرية . ثم عين استاذا للرياضيات في جامعة روما ، غير ان عمه استدعاه مجددا الى بولونيا ، فقفل راجعا ليتسلم هناك مهامه الدينية فعين قسيسا في مدينة فرونبورغ (Frauenbourg) وكان ذلك عام ١٥٠٦ . قبل كوبرنيك مهمته الجديدة على مضض الا انه ثابر وهو يمارس وظيفته الجديدة على مطالعة الكتب الجديدة ومقارعة اقرانه بالحجة والمنطق . وكان عالما رياضيا فذا ، فتناول في عزلته ، علم الفلك واقام مرصدا أخذ يتطلع منه الى القبة السماوية ، ونشر عام ١٥٤٣ اول مؤلفاته ضمنه مشاهداته الفلكية .وانتهى فيه الى نظرية جديدة في الكون تعاكس تماما نظرية بطليموس ، اذ نادى بدوران الارض حول محور يمر من قطبيها ، وانتقالها في الوقت ذاته على مدار دائري حول الشمس .

اعتبر كوبرنيك الشمس مركز العالم ، والارض كوكبا من جملة الكواكب الاخرى لا تتمتع بأي ميزة اخرى ، تدور هي كباقي الكواكب حول الشمس على مدارات دائرية تقع الشمس في مركزها . ولم يحدث مؤلف كوبرنيك ضجته المتوقعة في الاوساط العلمية لانه نشر في مكان بعيد عن وطيس المعركة ولم تكن النظريات الجديدة لتنتقل في تلك الآونة بالسرعة التي نعهدها اليوم . ولم تنتبه السلطات الى خطر آرائه الا بعد وفاة العالم عام ١٥٤٣ وبعد ان تبناها من بعده كل من العالمين كبلر وغاليله . ولد كبلر (Kepler) عام ١٥٧١ ، وكان بالاضافة الى اطلاعه الواسع على علم الفلك عالما رياضيا فذا . قرأ كبلر مؤلفات بطليموس فلم ترق له ، وحاول انتقادها فلم يوفق في ايجاد البراهين الكافية ، ثم وجد ضالته في مؤلفات كوبرنيك التي وقع عليها بطريق

الصدفة ، وعاد بعدها مجددا الى مؤلفات بطليموس ونجح هذه المرة في اثبات خطئها مستعينا بالمفاهيم الرياضية والاستقراءات المنطقية ، فأتت ابحاثه مطابقة لآراء كوبرنيك •

عاد بعدها كبلر الى مراقبة الكواكب وتعيين حركتها النسبية ، فانكب على مشاهدة كوكب المريخ وعين أوضاعه المختلفة بدقة فوجدها تتتالى على مدار مستمر غير دائري بل بيضوي تقع الشمس في أحد محرقيه • فصاغ عندها مبدأ جديدا يعرف اليوم بقانون كبلر الاول مفاده :

« تدور الكواكب السيارة بما فيها الارض على مدارات ناقصية مستوية تقع الشمس في احد محرقيها » •

ونجح بعدها في صياغة قانونه الثاني :

« يمسح المستقيم الواصل بين مركز الكوكب السيار ومركز الشمس سطوحا متساوية في فترات زمنية متساوية » وبعد لأي صاغ قانونه الثالث : « يتم الكوكب السيار دورته على مداره في فترات زمنية ثابتة وتتناسب مربعات هذه الفترات مع مكعب اطوال المحور الكبير للمدار الناقصي » •

وسمح القانون الثالث لكبلر بتعيين المحاور الكبيرة للمدارات وبالتالي تعيين كافة عناصرها •

وتمكن كبلر بمبادئه الثلاثة من تقويض النظريات المدرسية ، كما تسنى له ايضا اتمام نظريات كوبرنيك اذ حول مدارات الكواكب من دائرية الى ناقصية كما بين ان حركة الكوكب على مداره ليست حركة منتظمة كما ظنها كوبرنيك وانما حركة متغيرة ويدور الكوكب بسرعة عندما يكون قريبا من الشمس وتتباطأ حركته بابتعاده عنها ووضع كبلر

بقوانينه الثلاثة القواعد الاساسية لعلم التحريك ، وكانت هذه القوانين الحافز الاول للعالم نيوتن للتعمق في دراسة الكون وتوصله في النهاية الى وضع مفهوم جديد للكون ندعوه اليوم بالمفهوم الكلاسيكي .

ولم تقتصر ابحاث كبلر على الظواهر الفلكية بل تناولت العلوم المجردة والفلسفية غير ان افكاره في هذين الفرعين بقيت مشوبة بالغشاوة المدرسية .

بحث كبلر في عطالة الاجسام اذ قال : « يتألف الجزء الاكبر للكون من المادة . وتتصف هذه المادة بخاصة اساسية تدعى العطالة او القصور الذاتي ومن ميزاتها انها تأبى تغيير وضع المادة . فاذا كانت المادة ساكنة وأثر عليها بغية تحريكها قاومت العطالة هذه الحركة . كذلك اذا كانت المادة متحركة واريد ايقافها قاومت العطالة هذا الايقاف . وتزداد عطالة المادة بازدياد تركيزها ... » .

ويتابع كبلر في مكان آخر « تتسبب مادة الارض في عطالتها : واعطى الخالق في البداية الارض الدفعة الاولى واحتفظت الارض بفضل عطالتها بهذه الدفعة ، وما زالت الدورات تتتابع حتى يومنا هذا ولا يعوق الارض في حركتها أي عائق يدعو لتخامدها ، والدفعة الاولى التي حباها الخالق بها اصبحت « روحا وهذه الروح هي من طبيعة خاصة ، فهي لاتكسب الارض خاصية النمو ولا قابلية المناقشة وانما غايتها فقط تحريك الارض وتنسيق حركتها » .

يبدو جليا مما سبق كيف ان عقائد كبلر الفلسفية بقيت متأثرة الى حد بعيد بعقيدته الدينية والتقاليد المدرسية . والبون شاسع بين مفهومه في العطالة وافكاره المتحررة التي عبر بها بوضوح في قوانينه الفلكية .

وبحث كبلر في الجاذبية فقال : « القوى الجاذبة التي يؤثر بها جسم على آخر ليست سوى تعبيرا عن الالفة المتبادلة بين جسمين من نـوع

واحد . وما الجاذبية المغناطيسية الا نوع من انواع هـذه الالفة . فالارض تجذب الحجر اليها ويتجه هذا نحو الارض بدافع الالفة بـين مادة الارض والمادة المماثلة لها المؤلفة للحجر » .

ويتابع كبلر قائلا : « يعلل المدرسيون سقوط الاجسام على الارض بكون كل جسم يفتش عن مكانه الاصلي الا وهو مركز العالم . وقد ثبت خطؤهم عندما بينا ان الارض لا تبقى ثابتة في مكانها . فهي لم تعد تمثل ذلك المكان المرموق الثابت الذي سمي بمركز العالم ، ورغم انتقال الارض ثابرت هذه الاجسام في سقوطها نحوها ... »

« فاذا وضعنا في منطقة من العالم وبمعزل عن كل تأثير خـارجي جسمين ماديين تفصل بينهما مسافة معينة انـدفع كل من الجسمين في اتجاه الآخر تماما كما ينجذب قطب مغناطيسي الى قطب مغناطيسي آخر ويتم تلاقي الجسمين في مكان يقع بين وضعيهما الاصليين ، وتتناسب المسافة التي يقطعها كل جسم متجها نحو الآخر عكسا مع وزن هـذا الجسم » .

يتضح مما سبق كيف ان مفهوم كبلر للجاذبية كان اكثر وضوحا وواقعية من مفهومه للعطالة .

وليس هنالك من شك بان العالم نيوتن استعان كثيرا بآراء كبلر وناقشها . لذا يعتبر كبلر بما اورده من مبادىء في الفلك والميكانيك والجاذبية الاب المباشر للعبقري نيوتن .

ولا يسعني قبل ان انهي هذه اللمحة التاريخية السريعة لتطور علمي الفلك والميكانيك من ايجاز المآثر العلمية للعالم غاليله وما قدمه مـن خدمات جلّى لكل من علمي الفلك والميكانيك التطبيقي . ويعتبر غاليله اول عالم تجرأ على اجراء التجارب بغية وضع اسس العلوم ، فثار هو ايضا على التقاليد المدرسية وساهم مساهمة جبارة في كسر القيود لينطلق العلم من معقله ماردا جبارا يدفع بالحضارة قدما الى الامام .

ولد غاليليو غاليله (Galiléo Galilei) عام ١٥٦٤ ، وبدأ حياته العلمية بالتعمق في الآداب اللاتينية واليونانية القديمة ، فاضطر بطبيعة الحال الى قراءة ارسطو والتأمل في آرائه ثم تحول بعدها الى دراسة الطب ، وقطع شوطا كبيرا في هذه الدراسة • وجرت له وهو في التاسعة عشرة من عمره حادثة بسيطة في مظهرها عميقة في أثرها اذ تنبه ذات يوم وهو في الكنيسة الى اهتزازات الثريا المدلاة من سقف المعبد وقدر الزمن اللازم لكل اهتزازة كاملة بعدد نبضات قلبه فوجد هذه الاهتزازات متوافقة رغم ما يصيبها من تخامد •

وكانت هذه الحادثة حادثة اعتيادية تقع في كل يوم بل في كل لحظة يشاهدها معظم الناس الا ان العقول الجبارة تمتاز عن سواها بكونها تهتم بالظواهر التي تبدو للغير تافهة لتستخلص منها نظما وقواعد مذهلة • كم من الناس شعر بان وزنه داخل الماء اقل من وزنه الاعتيادي ؟ وكم منهم شاهد اهتزازات الثريا ؟ وأخيرا كم وكم منهم لاحظ التفاحة تسقط من الشجرة ؟ ورغم ذلك لم تعرف البشرية سوى ارخميدس واحدا ليستنتج من ملاحظته مبادىء علم توازن السوائل وغاليله واحدا ليجد قوانين سقوط الاجسام ونيوتن واحدا ليكتشف قوانين الجاذبية العالمية •

واخذت الملاحظة المذكورة على غاليله كل تفكيره فترك دراسة الطب جانبا واندفع بكليته الى دراسة العلوم الرياضية والميكانيكية وبرع فيها وتألق نجمه ، فاختير وهو في الخامسة والعشرين من عمره ليستلم كرسي الرياضيات في جامعة بيزا (Pize) •

وما ان استلم غاليله وظيفته حتى بدأ يجاهر بانتقاد تعاليم ارسطو ويظهر امام الملأ بانه من مؤيدي افكار كوبرنيك • واتخذ لنفسه اسلوبا جديدا في تدريس العلوم الفيزيائية اذ اعتمد التجريب اساسا لها •

وانتقد ارسطو قائلا : « تسقط الاجسام كلها بسرعة واحدة مهما

اختلف وزنه . ولاثبات ذلك صعد غاليله الى اعلى برج بيزا المائل والقى من فوقه جسمين يزن احدهما رطلين بينما يزن الآخر عشرة ارطال وبهت الجميع لما رأوا بأم اعينهم كيف ان الجسمين ، الثقيل والخفيف ، يترافقان في سقوطهما نحو الارض . وقلقت السلطات الحاكمة من ذيوع شهرة الشاب ومن افكاره الجريئة فاخذت بمقاومته جهاراً . فخاف غاليله وبدل من لهجة محاضراته ، ووجدها فرصة ذهبية . عندما عرض عليه امير بادوا (Padoue) كرسي الرياضيات في جامعة المقاطعة . فغادر بيزا غير آسف . نجح غاليله في وظيفته الجديدة نجاحا باهراً مما اضطر ادارة الجامعة الى تبديل قاعة محاضراته مرتين على التوالي في شهر واحد لقلة اتساعها ولكثرة الوافدين لاستماع محاضراته . واكتسب غاليله شهرة عظيمة وتبوأ اعلى المراكز في الجامعة والمجتمع . وفي عام ١٦٠٩ ترامى الى مسامعه نبأ اختراع اول نظارة في هولندة ، وكان في هذه الآونة مغرما بأفكار كبلر وود لو أنه تمكن من اثباتها فوجد في الاختراع الجديد ضالته فحصل عليه وأدخل عليه التحسينات حتى جعله يقرب الاجسام البعيدة ثلاثين مرة . وقدم جهازه الجديد هدية لحاكم البندقية الذي رفعه بدوره على سطح كنيسة القديس مرقص ، وتوافد الامراء والنبلاء على المكان للنظر في الجهاز العجيب الذي كان يسمح لهم برؤية البواخر البعيدة في الافق والتحقق من هويتها ورؤية الناس الخارجين من المعبد والتعرف عليهم واحدا واحدا . فلاقت نظارة غاليلة نجاحا منقطع النظير وضوعف راتبه .

ولم يفعل غاليله كما فعلت حاشية الحاكم بل وجه نظارته نحو القبة السماوية عوضا من توجيهها نحو الارض . وكم كان سروره عظيما عندما استطاع ان يحدق في عالم لم يسبقه الى رؤيته احد من قبله . حدق في القمر ، ويا لعجب ما رأى . كم كان يود ان يرافقه ارسطو في جولته ليرى بأم عينه ان سطح القمر ليس صقيلا كما ادعى ، بل هو سطح

متعرج مليء بالجبال والمنخفضات . ووجه نظارته الى المجرة (Voie lactée) فوجدها مشكلة من غبار كثيف من النجوم المضيئة . وأخيرا وجه نظارته نحو المشتري (Jupiter) فاكتشف للكوكب أربعة أقمار تدور حوله .

ونشر غاليله عام ١٦١٠ كتابا ضمنه مشاهداته الفلكية وكتب في مقدمته أنه يدعو كل من لا يصدقه أن يأتي اليه وينظر بأم عينه الى القبة السماوية . ولاقى مؤلف غاليله نجاحا باهرا واستقبلته الاوساط العلمية بالتصفيق والهتاف ، بينما استقبلته الاوساط الحاكمة والاوساط الدينية بالتحفظ والحذر ، وأخذت تقاومه بكل ما أوتيت من سطوة وجبروت ، اذ وجدت فيه ضربة قاضية لآخر ما تبقى من التقاليد الفكرية والخلقية ، وتعالت الانتقادات من كل حدب وصوب وقيل لغاليله : كيف تدعي بوجود أكثر من سبعة كواكب سيارة بينما لا يحوي شمعدان المعبد الا على سبعة فروع ولا يحوي الرأس البشري سوى سبع فتحات ؟ وهزأ غاليله كما هزأت معه الاوساط الفكرية من هذه التفاهات واكتفى كرد على الهجوم بأن قدم الى كبير الاساقفة نظارته هدية كي يشاهد ومن يناصره صحة ما قاله .

وتابع غاليله مشاهداته ووجه نظره الى كوكب الزهرة (Venus) فوجده يمر بمراحل تشبه الى حد بعيد أطوار القمر . واستطرد في استنتاجه فقال بأن كافة الكواكب السيارة بما فيها الارض تدور حول الشمس . وهنا التقى غاليله مع أفكار كوبرنيك وكان هذا اللقاء بداية لمتاعبه ، اذ بدأ الجو يكفهر من حوله وفي هذه الفترة عرض عليه مجددا كرسي الرياضيات في جامعة بيزا فترك جامعة بادوا وهو أكثر ما يكون تحمسا لنشر تعاليم كوبرنيك في أصقاع أخرى . وما ان بدأ في القاء محاضراته وشرح نظرياته حتى ثار عليه أهالي بيزا وهوجم غاليله من فوق منابر المعابد وشنت عليه حملة واسعة وصلت الى مسامع البابا ، فأصدر الفاتيكان عام ١٦١٩ قرارا يحرم فيه نشر عقائد كوبرنيك

ومقاضاة كل من ينادي بها • ولم يرق هذا الحكم لرجال الدين الذين كانوا يطالبون بحكم أقسى وواصلوا حملتهم على غاليله وسنحت لهم الفرصة كي ينتقموا منه عندما أصدر عام ١٦٣٢ كتابا باللغة الايطالية ضمنه محاورة بين ثلاثة أشخاص ، يدافع فيها أحدهم عن بطليموس ويؤيد الاثنان الآخران كوبرنيك • وحرص غاليله على أن يكون الشخص المدافع عن بطليموس تافها وجاهلا وأورد على لسانه بعض العبارات التي اعتاد صديقه وسنده البابا على تردادها فثارت ثائرة البابا وقدم غاليله للمحاكمة بتهمة العودة الى البحث في مواضيع حرمتها الكنيسة • وتمت محاكمته يوم ٢٠ حزيران عام ١٦٣٣ • وخاف غاليله على حياته وتراجع أمام هيأة المحكمة عن معتقداته وأقسم اليمين التالي : أنا غاليليو غاليله في السبعين من عمري أجثو على ركبتي وأضع نفسي بين أيديكم وأتطلع للكتاب المقدس وألمسه بيدي الاثنتين ، أنكر انكارا باتا كل ما سبق وجاهرت به فيما يتعلق بدوران الارض •

وأصدرت المحكمة بحقه حكما صوريا قضى بنفيه عن المدينة • وغادر غاليله قاعة المحكمة يعتصر قلبه الاسى والالم وتحز في نفسه الندامة • وخجل أمام نفسه وأمام الآخرين مما نطق به لسانه وغادر البلدة قاصدا قريته وأقسم على ترك علم الفلك وكل ما يمت اليه بصلة • ولما كان نشاطه لم يزل قويا حول تفكيره نحو الميكانيك وفي الحقبة القصيرة التي بقيت له من عمره استطاع غاليله أن يقدم للبشرية أكبر الخدمات وأعظمها اذ وجد علم التحريك واكتشف قوانينه •

نشر كتاب « العلوم الميكانيكية » لمؤلفه غاليله عام ١٦٤٩ أي بعد وفاة الكاتب بستة أعوام ويعد هذا الكتاب موسوعة في العلوم الميكانيكية وتحفة فريدة في فن التجريب •

بحث الكتاب في علم التوازن ، وخص الآلات البسيطة بقسط وافر

من فصوله . وعرف الآلة بكونها الجهاز القادر على تحريك الاجسام الثقيلة من غير تجزئتها ، ويلزم للآلة زمن طويل وقوة صغيرة لتتمكن من اتمام عملها ، وما نكسبه في القوة نخسره في الزمن .

بحث غاليله أيضا في الجاذبية وعرفها بكونها : الميل الطبيعي للجسم في اتجاهه نحو مركز الارض .

ودرس حركة سقوط الاجسام واستنتج قوانينها من تجارب دقيقة للغاية أجراها على المستوي المائل . ودرس الحركة النوسية وتوصل بدراستها الى ما يشبه مبدأ حفظ الطاقة . وخص كتابه ببحوث طويلة ناقش فيها مفهوم العطالة .

ومهد السبيل للعالم نيوتن كي يضع صيغة النص النهائي لقانون العطالة .

درس حركة القذائف وبين الخطأ الذي وقع فيه المدرسيون وتوصل بنتيجتها الى خاصة تركيب الحركات . وسوف نعود الى أبحاث العالم غاليله بشكل مفصل في أثناء دراستنا للقوانين الاساسية للميكانيك الكلاسيكي . تلك القوانين التي وضعها العالم نيوتن وبقيت سائدة طيلة قرنين ونيف .

* * *

الفصل الثاني

المبادئ الاساسية في الميكانيك الكلاسيكي

نيوتن Newton

توفي العالم غاليله في الثامن والعشرين من شهر كانون الثاني سنة ١٦٤٢ ولم تمض سنة واحدة فقط على وفاته حتى ولد في بقعة ثانية من العالم : في انكلترا ، عالم عبقري فذ اسمه اسحق نيوتن .

ولد نيوتن في الرابع من شهر كانون الثاني عام ١٦٤٣ في قرية صغيرة في انكلترا ، اسمها وولستورب (Woolstorpe) .

لم يبد نيوتن في طفولته علائم النجابة والعبقرية . كان طفلا عاديا لم يتميز بشيء عن باقي أقرانه . أنهى دراسته الابتدائية والثانوية في قريته ، وتقدم عام ١٦٦٣ الى مسابقة لدخول جامعة كمبردج (Cambridge) فكان ترتيبه الرابع والعشرين على مئة وأربعين مرشحا . ودخل الجامعة غير أن وباء الطاعون حل في البلدة فأغلقت الجامعة وهجر نيوتن البلدة عائدا الى قريته دون أن يتيسر له الوقت الكافي كي يصطحب معه كتبه ومذكراته .

وهناك في قريته وجد نفسه معزولا عن العالم الخارجي ، وجد نفسه وجها لوجه أمام الطبيعة فأخذ يتأملها ويناقش حدوث ظواهرها المتعددة فتفتقت للمرة الاولى عبقريته وتجلى نبوغه الفريد .

كان في أتفه الاشياء وأبسطها مدعاة لتأملاته ومكث على هذا المنوال

طيلة فترة عامين لم يبارح فيهما الحقل ولم يتصل بانسان فكان نتـاج السنتين عظيما ، فوصفه بعضهم بكونه لو وضع على كفة ميزان ووضع في الكفة الثانية نتاج البشرية جمعاء خلال الثماني عشرة قرنا المنقضية ، بعد وفاة أرخميدس لرجحت كفة نيوتن . اذ وضع نيوتن خلال سنتين مبادىء حساب التفاضل واكتشف الجاذبية العالمية ووضع القواعـد الاساسية لعلمي الضوء والصوت ...

بعد زوال خطر الطاعون ، عاد نيوتن الى كمبردج وتقدم الى مسابقة كان ترتيبه فيها الحادي عشر على أحد عشر متقدم .

ورشحه استاذه عام ١٦٦٩ لكرسي الرياضيات في جامعتها ونجح في مهمته خير نجاح مما دعا عمدة الجامعة الى اختياره عضوا في الاكاديمية الملكيـة (Royal Society) عام ١٦٧٢ . انصرف نيوتـن بين عامي ١٦٨٤ ــ ١٦٨٦ الى تـأليف كتابه المشهور « المبادىء » (Principia) ونشر مؤلفه عام ١٦٨٧ وأحدث في الاوساط العلمية الضجة المتوقعة . ويعتبر هذا الكتاب أعظم نتاج فكري أنتجته عبقرية الانسان اذ مكن العلماء من الغوص في أعماق الطبيعة وتعليل مختلف ظواهرها تعليلا رياضيا منطقيا .

بحث نيوتن في كتابه « المبادىء » عن آلية حركة الاجرام السماوية وربط بين هذه الحركة وحركة الاجسام التي تتحرك على سطح الارض في شروط مناسبة وبقي كتاب « المبادىء » طيلة قرنين ونيف المرجع الوحيد لعلم الميكانيك لانه تنـاول كافة فروع هذا العلم من توازن وحركة وتحريك .

وقد أرهق التأليف جسم وعقل نيوتن فأصيب عام ١٦٩٢ بمس من الجنون وبقي طريح الفراش حتى نهاية عام ١٦٩٣ وعندما شفي من

مرضه عين حاكما للمصرف المركزي ثم نجح في الانتخابات النيابية عام ١٧٠١ وأغدق عليه ملك الانكليز لقب سير (Sir) عام ١٧٠٩ ٠

ذاعت شهرة نيوتن في كافة الاوساط العلمية الاوربية وأخذ العلماء يحجون اليه من كل حدب وصوب ، حتى أن أحد هؤلاء وهو العالم الفرنسي الرياضي الشهير ، اوبيتال (Hospital) سأل مرة أحد أصدقاء نيوتن المقربين ، عما اذا كان مؤلف كتاب « المبادىء » ينام ويأكل ويشرب كباقي البشر ٠

توفي نيوتن في العشرين من شهر آذار عام ١٧٢٧ ووري جثمانه مقبرة وستمنستر بجانب ملوك وعظماء انكلترا ٠

وبالرغم من رحيل العالم العبقري بقيت بعده شعلة العلم متوقدة ٠ كان عدد الذين فهموا في البداية القواعد والمبادىء الجديدة قليلا ، وتأسست مدرسة جديدة أخذت على عاتقها نشر وتطوير أفكار « المعلم » حتى أصبحت آراء نيوتن هي الآراء الوحيدة النافذة فسيطرت على سواها من المبادىء وطغت على مختلف فروع العلم ٠

فتاريخ العلم هو صراع مستمر بين مبدأ يراد ادخال أكبر عدد ممكن من الظواهر في اطاره . وبين ظواهر متفرقة تتمرد على هذا الاطار ٠ وشملت مبادىء نيوتن جميع فروع العلم كالحرارة والكهرطيسية والتفاعلات الكيميائية وغيرها وأخضعت كل ظاهرة من هذه العلوم الى قوانين التحريك التي صاغها ٠ فكان أن أحرزت هذه الطريقة نجاحا منقطع النظير من الوجهة العلمية التجريبية ، وسرعان ما وجد أن التعليل الميكانيكي يجب أن يكون انموذجا يحتذى في كافة العلوم الفيزيائية وحتى اذا اقتضى الامر في كل علم على الاطلاق ٠

وسمي عصر نيوتن بالعصر الكلاسيكي وأطلق على مبادئه ومفاهيمه اسم المبادىء والمفاهيم الكلاسيكية ٠

لخص نيوتن المفاهيم الجديدة في أربعة قواعد أساسية ينبغي على العالم التقيد بها حتى تأتي أبحاثه مطابقة للواقع المنطقي للاحداث • واليكم فيما يتبع نص هذه القواعد •

القاعدة الاولى : لكل ظاهرة طبيعية سبب ، وينبغي علينا في تعليل أية ظاهرة طبيعية أن نقتصر على الاخذ بالاسباب اللازمة لحدوثها بغض النظر عن سواها من العوامل •

القاعدة الثانية : ينبغي ارجاع ما أمكن ارجاعه من الظواهر الطبيعية المتماثلة الى سبب واحد •

القاعدة الثالثة : اذا أمكن اخضاع بعض الاجسام للتجريب وحصلنا بنتيجة التجريب على ظواهر شبيهة بالتي تنتج عن أجسام أخرى بعيدة عن المنال التجريبي ، أمكننا عندها تعميم خواص الجسم المجرب عليه حتى تشمل الاجسام الاخرى •

القاعدة الرابعة : ينبغي الاعتماد في وضع الفرضيات العلمية : على التجارب ، وتبقى هذه الفرضيات صحيحة طالما لم توجد ظاهرة طبيعية واحدة تناقضها او تحد من صحتها •

وسنستعرض فيما يتبع المبادىء الاساسية لعلم الميكانيك كما وضعها العالم نيوتن وطورتها مدرسته من بعده ، ولن أتقيد في ذلك بالتسلسل التاريخي للنظريات بل سوف أكتفي بايجاز المعلومات الضرورية والكافية لفهم الافكار الجديدة التي نادى بها العالم اينشتين في نظريته النسبية •

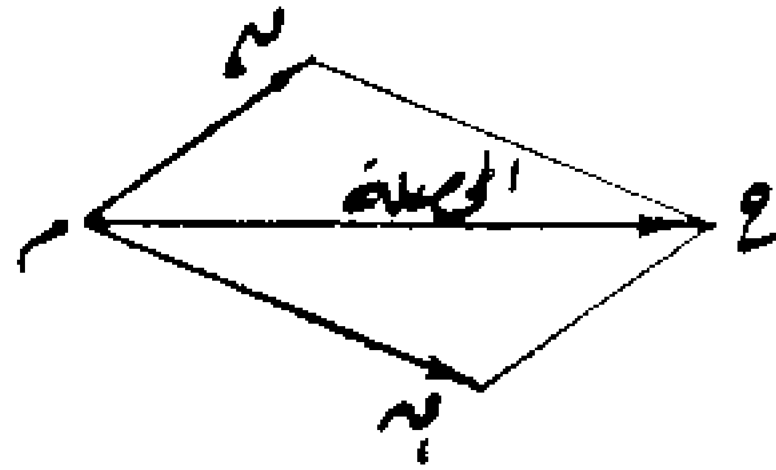
ينقسم علم الميكانيك الى ثلاثة أقسام : التوازن والحركة والتحريك وقد شرحها نيوتن باسهاب وتفصيل في كتابه المبادىء • ووضع لها قواعدا وأسسا جديدة اعتبرها معاصروه انموذجا في الترتيب والوضوح •

التوازن (Statique)

كان علم التوازن ، قبل أن يتناوله نيوتن ، علما قائما بذاته له مبادئه وقوانينه . توسع العالم ارخميدس ومن آتى بعده من العلماء المدرسيين . في دراسته وكان هذا العلم يعتمد مبدأ أساسيا هو مبدأ الرافعة ومفاده : « العمل المحرك يساوي دوما العمل المقاوم » .

وعمل نيوتن ومدرسته في تطوير هذا العلم واستبدل مبدأ الرافعة بمبدأ أعم وأفضل يسمى اليوم بمبدأ متوازي اضلاع القوى ، ومفاده : اذا أثرت قوتان على جسم فان عمل ، القوتين يعادل عمل قوة واحدة تنطبق على قطر متوازي الاضلاع المرسوم على القوتين . (شكل ١) .

فرأينا بذلك الميكانيك الكلاسيكي يستبـدل المفهوم الفيزيائي المدرسي للقوة بمفهوم رياضي مجرد .



شكل ١

لم يفرق المدرسيون بين القوة والقدرة أو العمل .

لان مفهوم القوة ، الذي وجد منذ القدم ، كانت غايته التعبير عن احســاس الشخص في بذله عملا عضليا عند قيامه بأعماله اليوميــة . فكان يوصف الشخص بالقوة اذا تمكن من رفع جسم ثقيل مثلا ، بغض النظر عن المسافة التي يرفع اليها هذا الجسم أو الزمن اللازم لرفعه . وقد تتعرض قوة الرجل للزيادة أو النقصان بحسب ظروفه البيولوجية . فوجد نيوتن نفسه ازاء ذلك مضطرا في البداية الى تعريف القوة تعريفا صحيحا واضحا لا يشوبه أي غموض . فكان أن أورد التعريف التالي :

« القوة هي السبب القادر على تحريك الجسم الساكن أو تغيير حركة الجسم المتحرك أو تبديل شكله » •

واعتبرت القوة مقدارا هندسيا يتطلب تعيينه عددا من العناصر : نقطة التأثير والشدة والمنحى والاتجاه • ومثلت القوة بشعاع أي بسهم يشير الى منحى عمل القوة واتجاهها ويقيس طوله شدة هذه القوة •

واتفق بعدها على واحدة دولية للشدة فكان أن اعتبر وزن جسم معين هو أصلح مقدار لتحديد قيمة القوة لان وزن الجسم هو في الحقيقة نوع من أنواع القـوة يحرك الجسم دافعا اياه نحو مركز الارض • واختير الكيلوغرام ليكون واحدة لتقـدير شدة القوة كما اختيرت الدينة كواحدة لقياس شـدة القوى الصغيرة كالقوى الكهربائيـة والمغناطيسـية •

وتجمع القوى المؤثرة على الجسم جمعا هندسيا ، اذ تجمع قوتان منها على طريقة متوازي الاضلاع وتضاف القوة الناتجة عن هذا الجمع الى قوة ثالثة أيضا على طريقة متوازي الاضلاع وهكذا ••• ونسمي هذه الطريقة في الجمع بالجمع الهندسي •

ويشترط لاتزان الجسم أن ينعدم المجموع الهندسي للقوى المؤثرة عليه • وهذا الشرط لازم وغير كاف اذ يمكن أن ينعدم مجموع القوى وتكافيء عندها المجموعة مزدوجة وفي هذه الحالة لا ينتقل الجسم بل يدور • لذا لا يتزن الجسم الا بانعدام المجموع الهندسي للقوى المؤثرة عليه وبانعدام مجموع عزومها حول نقطة من الفراغ •

وقبل دراسة اتزان الجسم ينبغي التفتيش عن القوى المؤثرة عليه • وتنشأ بعض هذه القوى نتيجة اتصال الجسم المدروس بأجسام أخرى مجاورة له ونخص من هذه القوى قوى رد الفعل • فقد وضع نيوتن مبدأ أساسيا يسمى مبدأ الفعل ورد الفعل ومفاده :

« اذا أثر جسم على آخر بقوة ما ، رد الجسم الثاني على المؤثر بقوة تساويها وتعاكسها • تسمى القوة المؤثرة بالفعل كما تسمى القـوة الناتجة عن التأثير برد الفعل • ورد الفعل يساوي الفعل ويعاكسه » •

الحركـة : (Cinématique)

بحث الحركة هو بحث هندسي صرف يختص بتعيين أوضاع المتحرك في فترات زمنية متتالية • ولا يتعرض بحث الحركـة لا من قريب ولا من بعيد للقوى المؤثرة على المتحرك •

ويتناول بحث الحركة حركة النقطة المادية وحركة الجسم الصلب • ويعرف الميكانيك الكلاسيكي النقطة الماديـة بكونها نقطة هندسية لا أبعاد لها ، تتركز فيها المادة • بينما يعرف الجسم الصلب بـكونه مجموعة من النقط المادية تبقى أبعادها النسبية ثابتة أثناء الحركة • واذا تحركت النقطة المادية على محور موجه سميت عندها حركتها بالحركة المستقيمة واذا تحركت النقطـة في مستوى سميت حركتها بالحركـة المستوية • والحركة الفراغية هي حركة نقطة مادية في الفراغ •

كان غاليله قد تناول في أبحاثه دراسة الحركات الطبيعية ، فوجد أن الكرة الملساء الموضوعة على منضدة أفقية مصقولة تبقى ثابتة ما لم تؤثر عليها قوة خارجية • واذا صدمت هذه الكرة صدمة خفيفة سارت على خط مستقيم وقطعت مسافات متساوية في فترات زمنية متساوية ودعيت هذه الحركة بالحركة المستقيمة المنتظمة •

ودرس غاليله أيضا حركـة السقوط الحر للاجسـام في الفضـاء ، فوجدها تسقط على خطوط شاقولية ولا تقطع مسافات متسـاوية في أزمنة متساوية وانما كانت المسافات المقطوعة تتناسب مع مربع الازمنة اللازمة لقطعها • وسميت هذه الحركة فيما بعد بالحركة المستقيمة المتغيرة بانتظام • كما درس غاليله أيضا حركة القذائف فوجدها تسلك خطـا

منحنيا يسمى بالقطع المكافىء ، وتمكن من تحليل هذه الحركة فوجدها محصلة لحركة مستقيمة منتظمة أفقية وحركة مستقيمة متغيرة بانتظام شاقـولية •

ودرس العالم كبلر حركة الاجرام السماوية فوجدها تتحرك عـلى قطوع ناقصـة بسرعة متغيرة •

تذكر نيوتن ، وهو في عزلتـه في القرية ، كافة هـذه الدراسات المبعثرة واعجب ببراعة ونباهة غاليله وكبلر ، انما وجدها ناقصة لاتؤلف فيما بينها وحدة متناسقة ، بل كانت عبارة عن معلومات مبعثرة ينبغي تنسيقها ثم تعميمها ان امكن على ظواهر طبيعية أخرى • كان هدف نيوتن الاسمى يكمن في صياغة قواعد راسخة لعلم الحركة تكفل ايجاد قوانينه العامة التي تنطبق على كافة الحركات المتماثلة اطالتها التجارب أو لم تطلها • كان وهو في قريته عاطلا عن العمل يلاحظ ويتأمل في كل صغيرة وكبيرة • يلاحظ سقوط الاجسام على مختلف أشكالها الهندسية وانواع موادها • يراقب الطيور في تحليقها في الجو ، والحيوانات في عدوها على الارض • كان يتمعن في كل ظاهرة محاولا تعليلها ودراسة كافة مراحلها فهو لم يكتف بالدراسات الكيفية لهذه الحركات بل وضع نصب عينيه ايجاد القوانين الكمية المترجمة لها •

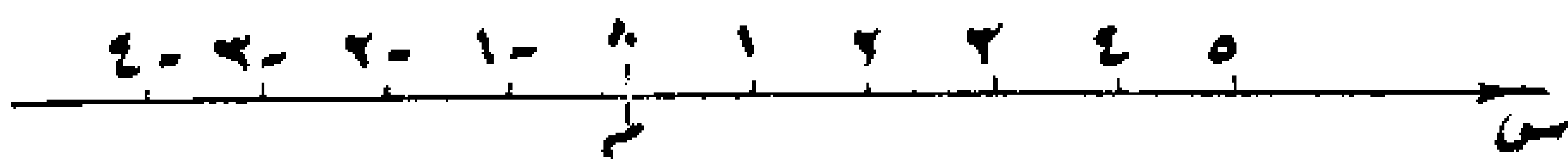
كانت هندسة اوكليدس والهندسة التحليلية لديكارت (Descartes) كافية لدراسة الاجسام الساكنة من حيث أبعادها وأشكالها • ولم يجد فيها نيوتن المعلومات الضرورية لدراسة الاجسام المتحركة • وعاودته ذاكرته الى أبحاث رياضية كان سبق أن نشرها العالم الرياضي الفرنسي فرما (Fermat) تختص بتعيين المستقيم المماس لمنحني ، اذ كان المماس بنظر فرما هو الوضع النهائي للوتر • وعملت هذه الذكريات فعلها في تفتق الملكة الرياضية عند نيوتن ، وساعدته على ابتكار علم رياضي

جديد دعاه « علم الانسياب » وسمي فيما بعد بعلم حساب التفاضل (Calcul différentiel) وسأل نيوتن نفسه : ما هي العلاقة بين المسافة التي يقطعها المتحرك على مساره والزمن اللازم لقطع هذه المسافة ؟ وهل بمقدورنا تعيين سرعة المتحرك في أية نقطة من مساره ؟ وأعطاه حساب التفاضل الجواب :

« السرعة في لحظة معينة وفي نقطة معينة من المسار ، تساوي مشتق المسافة بدلالة الزمن » •

واذا حافظ هذا المشتق على قيمة عددية ثابتة كانت الحركة المدروسة منتظمة •

واستعان نيوتن بالهندسة التحليلية لديكارت لتمثيل الحركات • فمثل الحركة المستقيمة على محور احداثي موجه ، انتخبت عليه نقطة تعتبر مبدأ للإحداثيات ، وقسم المحور الى أقسام متساوية الى يمين ويسار المبدأ ، وتحدد أوضاع المتحرك على هذا المحور بأعداد جبرية موجبة أو سالبة حسبما تقطع النقطة المتحركة الى يمين أو الى يسار المبدأ المفروض • (شكل ٢) •



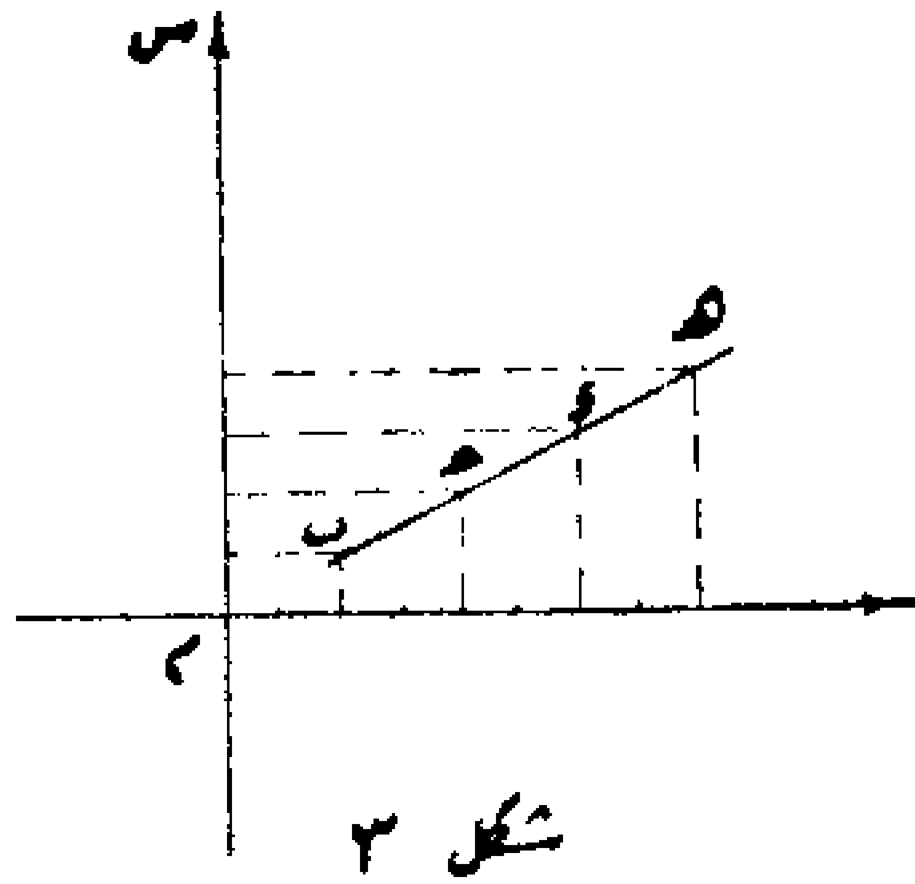
شكل ٢

وتمكننا الهندسة التحليلية أيضا من تحديد العلاقة الزمنية للحركة المستقيمة • نرسم على الورقة محورين موجهين متعامدين أحدهما أفقي يتجه لليمين والثاني شاقولي يتجه للاعلى (•شكل ٣) يتقاطع المحوران في نقطة (م) نعتبرها مبدأ للاحداثيات • نعتبر المحور الافقي محورا للازمنة ونقسمه على يمين ويسار (م) الى أقسام متساوية يمثل كل

قسم منها وحدة زمنية مفروضــة ؛ ونعتبر المحور الشاقولي محورا للمسافات ونقسمه الى أقسام متساوية يمثــل كل قسم منها مسافة مفروضة من المسار المستقيم المدروس .

نعين كل نقطة من المستوى الاحداثي المعتبر باحداثيتين :

بعدها عن مبدأ الفواصــل المنتخب على المحور الموجه أو مسار النقطة ، واللحظة الزمنية التي يصل بها المتحرك الى هذه النقطة .



شكل ٣

تمثل في المستوى الاحداثي المفروض أوضاع المتحرك ولحظــات مروره في هذه الاوضاع بنقط مثل ب ، حـ ، ء ، هـ . ونتوخى في هذه النقط أن تكون قريبة ما امكن من بعضها ثم نصل بين هذه النقط بخط مستمر فنحصل على خط بياني يدعى في بحث الحركة بمخطط الفصول للحركة المستقيمة المدروسة . فاذا كان مخطط الفصول مستقيما قلنا عندها ان الحركة المدروسة هي حركة مستقيمة منتظمة .

وسرعة المتحرك في كل نقطة من مساره تساوي كما ذكرنا مشتق المسافة المقطوعة بدلالة الزمن . واذا رمزنا بـ (س) للمسافة المقطوعة و بـ (ز) للزمن اللازم لقطعها أمكن عندها كتابة :

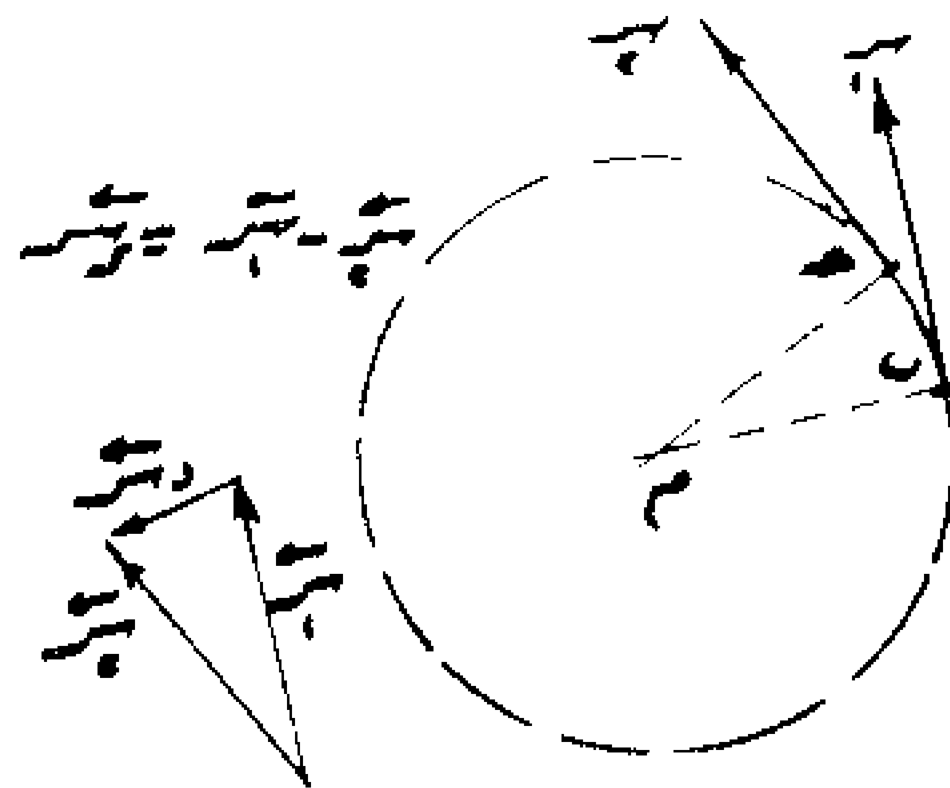
$$\text{سر} = \text{س}' = \frac{\text{دس}}{\text{دز}} \quad (١)$$

حيث يرمز سَ أو $\frac{\text{دس}}{\text{دز}}$ لمشتق المسافة بدلالة الزمن .

ويساوي ميل المماس لمخطط الفصول في نقطة ما منه الى المشتق (سَ) أي سرعة المتحرك في هذه النقطة .

وميل المماس لمستقيم ثابت هو مقدار ثابت في مختلف نقط هـذا المستقيم ، وعليه تكون سرعة الحركة المستقيمة الممثلة في الشكل (٣) ثابتة والحركة المستقيمة المدروسة هي اذا حركة مستقيمة منتظمة .

وفي الحركة المتغيرة لا تبقى السرعة ثابتة ، ولا نعني فقط بثبات السرعة بقاء قيمتها العددية ثابتة فالسرعة مقدار شعاعي كالقوة تمثـل هندسيا بسهم موجه تحدده العناصر الاربعة : نقطة التأثير والشدة والمنحى والاتجاه ويكفي أن يتحول عنصر واحد من عناصر الشعـاع كالشدة أو المنحى أو الاتجاه حتى نقول بتغير سرعة المتحرك . وتمثل سرعة النقطة المتحركة على مسار معلوم بشعاع محمول على المماس



شكل ٤

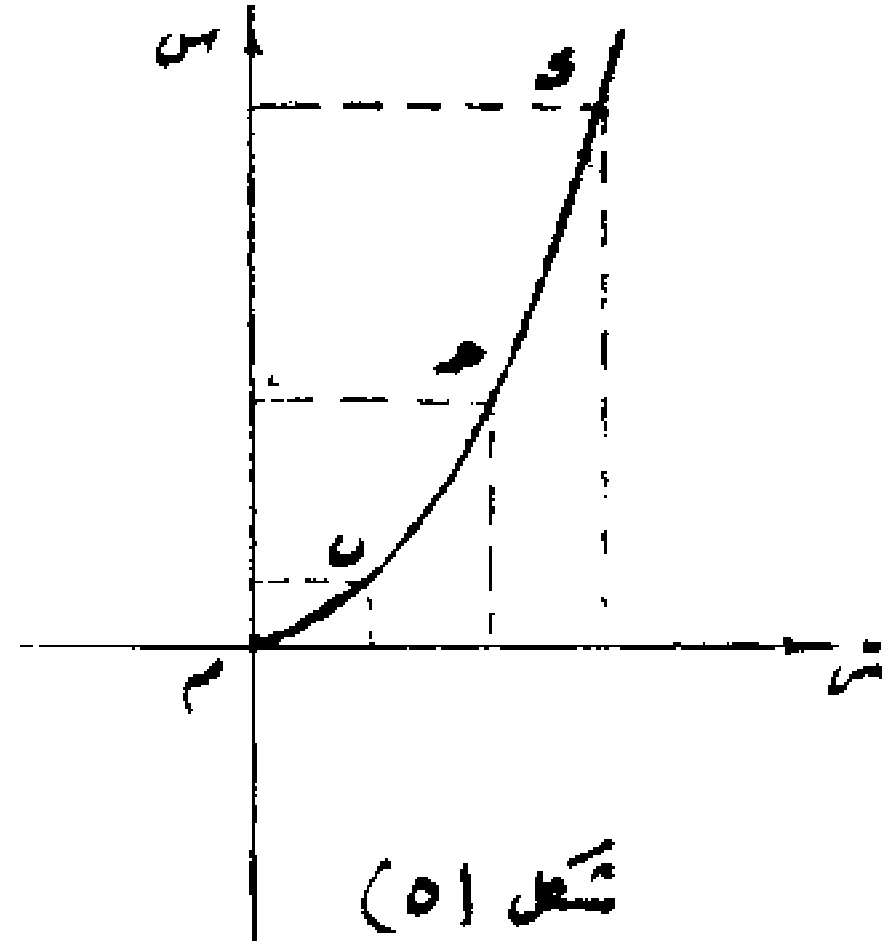
للمسار في النقطة المفروضة • (شكل ٤) وضع المتحرك هو نقطة تأثير شعاع السرعة ، استقامة المماس هي المنحى ، جهة السهم هي جهة الحركة وطوله هو الشدة • ففي الحركة الدائرية المنتظمة ، يدور المماس للدائرة مع المتحرك فيتغير بذلك منحى واتجاه شعاع السرعة • ورغم بقاء شدة الشعاع ثابتة (ثبات القيمة) نقول ان السرعة لا تبقى ثابتة بل تتغير مع وضع المتحرك على مساره •

فاذا انتقل المتحرك على الدائرة من النقطة (ب) الى النقطة (حـ) مثلا ، تحولت سرعته من القيمة الشعاعية $\overleftarrow{\text{سر}}_{1}$ الى القيمة الشعاعية $\overleftarrow{\text{سر}}_{2}$ • ويمثل الفضل الشعاعي ($\overleftarrow{\text{سر}}_{2}$ ــ $\overleftarrow{\text{سر}}_{1}$) تغير السرعة بين النقطتين ب و حـ • واذا كانت النقطة (حـ) قريبة قربا لا متناهيا من النقطة ب رمزنا عندها لتغير السرعة بالرمز ($\overleftarrow{\text{د سر}}$) ويستغرق عندها المتحرك في انتقاله من (ب) الى (حـ) زمنا صغيرا لا متناهيا في الصغر يرمز له بـ (د ز) ويدل المقدار $\frac{\overleftarrow{\text{د سر}}}{\text{د ز}}$ على تغير السرعة في واحدة الزمن وهو يساوي رياضيا لمشتق السرعة بدلالة الزمن ويسمى بالتسارع ويرمز له بـ تع أو سرَ •

والتسارع هو كالسرعة مقدار شعاعي تعينه العناصر الاربعة : نقطة التأثير والمنحى والاتجاه والشدة • واذا بقي شعاع التسارع ثابتا بالمنحى والجهة والشدة أثناء الحركة سميت عندها الحركة المعتبرة بالحركة المتسارعة (أو المتباطئة) بانتظام • وحتى يبقى شعاع التسارع ثابتا بالمنحى ينبغي أن يسير المتحرك على مستقيم أو في مستوي وعليه ينبغي أن تكون الحركة المتسارعة بانتظام حركة مستقيمة أو مستوية •

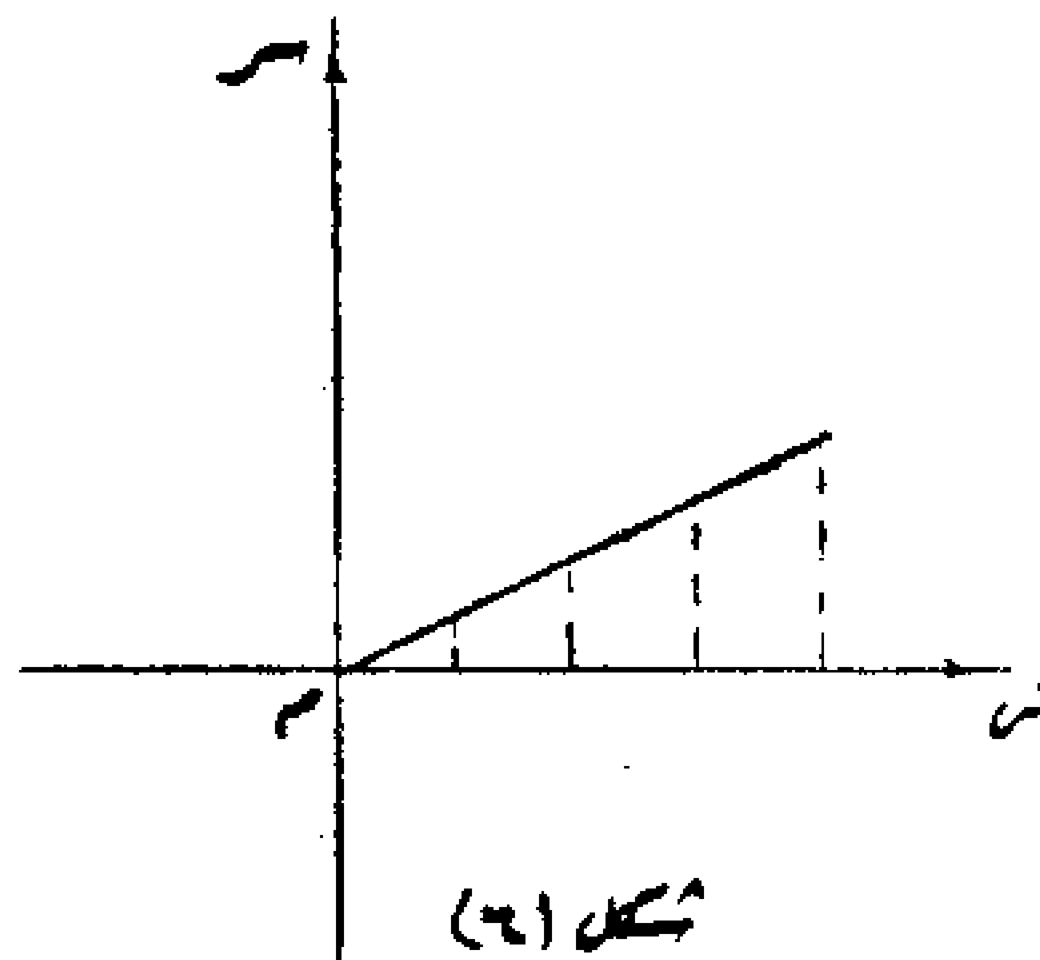
واذا مثلنا الحركة المستقيمة المتسارعة بانتظام تحليليا في المستوى الاحداثي (س ، ز) حصلنا عندها على مخطط للفصول منحني (قطع مكافيء) ويتحول ميل المماس لهذا المنحني من نقطة الى أخرى • وتبقى

السرعة ثابتة في المنحي بينما تتحول قيمتها الجبرية من نقطة الى أخرى (شكل ٥) • كما يمكننا تمثيل تحولات قيمة السرعة بدلالة الزمن في



شكل (٥)

مستوى احداثي آخر يكون محوره الافقي محورا للازمنة ومحوره الشاقولي محورا للسرعة • ونحصل في هذه الحالة على مخطط للسرع شكله مستقيم ويدل هذا المستقيم على ثبات القيمة العددية للتسارع • لان التسارع وهو بالتعريف « سرعة السرعة » يقاس بميل المماس لمخطط السرع (شكل ٦) • وانتقل بعدها نيوتن الى المسألة العكسية فوجد



شكل (٦)

أنه بالامكان دراسة الحركة ، لدى تعيين سرعة المتحرك ووضعه بدلالة الزمن بشرط معرفة تحولات التسارع بدلالة الزمن ، وابتكر لهـذه الغاية حساب التـكامل (Calcul intégral) وهي العمليـة العكسية لحساب التفاضل • وساهم حساب التكامل مساهمة فعالة في دراسة الحركات على مختلف أنواعها من مستقيمة ومستوية وفراغية • ولن يسمح لنا اطار هذا الكتاب بشرح أوفى لهذه الدراسات وانما نكتفي بالقول بأن نيوتن استطاع بالاستناد على اعتبارات رياضية بحتة التوصل الى تعيين كافة أنواع الحركة مهما كان شكلها معقدا •

التحريـك : (Dynamique)

عندما فرغ نيوتن من وضع الاسس النهائية لعلم الحركة وجدناه يتساءل عن سبب حدوث الحركة.واستمرارها ؟ سبق له وعرف القوة بكونها السبب القادر على تحريك الجسم • لم تكن هذه الفكرة جديدة في العلم ، لقد أقر الاقدمون بعدم امكانية حدوث الحركة الا بوجود قوة ، وأخطؤوا بتبنيهم نظرية العكس ومفادها : انه اذا ما حدثت حركة فلا بد لاستمرارها من وجود قوة •

وقال المدرسيون : تتابع القذيفة حركتها رغم زوال قوة اليد الدافعة بسبب اختراقها الهواء ، فالهواء بنظرهم هو العامل الذي يدفع القذيفة ويتابع حركتها ، بينما كان الهواء بنظر غاليله ونيوتن يقاوم الحركة ويعيق سيرها • يرى غاليله أن القذيفة تتابع حركتها في الهواء بتأثير ثقلها غير أنه أعطى أمثلة جديدة بين فيها أن بعض الاجسام تتابع حركتها رغم زوال القوى المؤثرة عليها • فالكرة الموضوعة فـوق منضدة أفقية مصقولة اذا دفعت دفعة خفيفة تحركت وبزوال الدفعة تتابع حركتها وتسير على خط مستقيـم قاطعة مسافات متساوية في فترات زمنية متساوية ، وتتخامد سرعتها تدريجيا بتأثير مقاومة الهواء والاحتكاكات •

فاذا أخلي المكان من الهواء وزالت أسباب الاحتكاكات تابعت الكرة حركتها المستقيمة المنتظمة الى الابد ، وتستمر في حركتها رغم انعدام القوى المؤثرة عليها . اذ تؤثر عليها قوتان متعاكستان الثقل الشاقولي المتجه الى الاسفل ورد فعل المنضدة الشاقولي المتجه الى الاعلى •

وحاول غاليله تعليل الظاهرة أعلاه بوجود علاقة محددة بين القوى المؤثرة على الجسم والسرعة التي يكتسبها • وتناول نيوتن آراء غاليله وأدخل عليها التعديلات الضرورية وقال : في الحركة المستقيمة المنتظمة يبقى شعاع السرعة مطابقا لذاته ، فالتسارع معدوم كما أن القوى المؤثره على الجسم المتحرك معدومة فحيث لا توجد قوى مؤثرة لا يوجد تسارع • « ومن المرجح أن تكون هنالك علاقة محددة بين القوى المؤثرة على الجسم والتسارعات التي يكتسبها هذا الجسم » •

وقبل القيام بأية دراسة وضع نيوتن . اعتمادا على مشاهدات غاليله التجريبية ، مبدأ أساسيا يعرف اليوم بقانون العطالة ونصه : « يبقى الجسم المعزول عن كل تأثير خارجي ساكنا • واذا أثرت عليه قوة تحرك • واذا زالت القوة المؤثرة عن الجسم المتحرك تحولت عندها حركته الى مستقيمة منتظمة » •

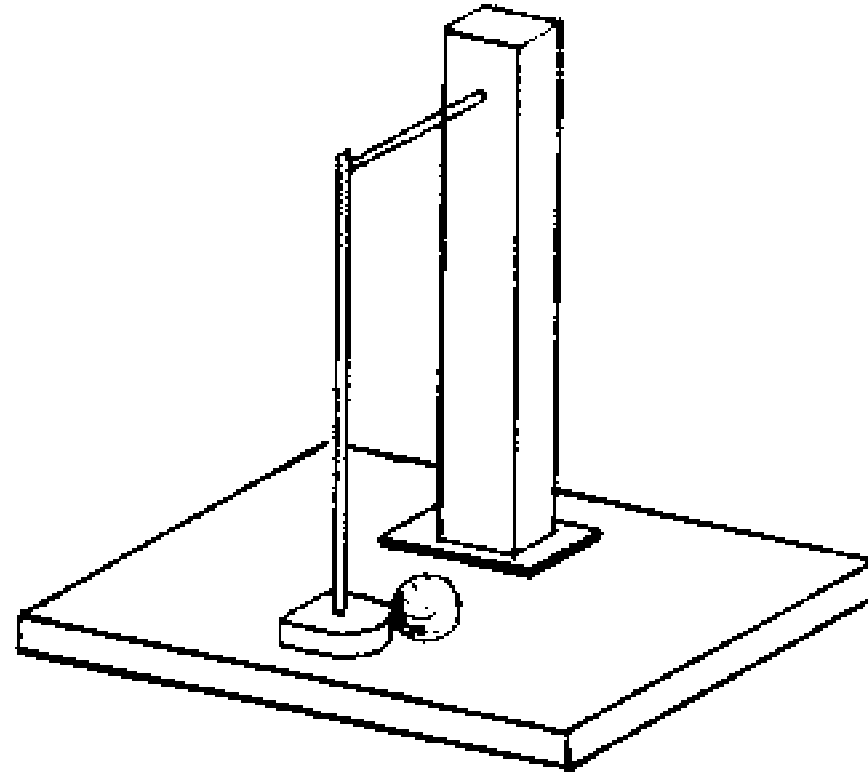
ولا يسعني هنا الا ايراد حقيقة علمية تجاهلها كافة المؤلفون • اطلعت شخصيا على مخطوطة ، للعالم العربي « ابن سينا » محفوظة في المكتبة المركزية في مدريد بحث فيها العلامة العربي مختلف العلوم الطبيعية • قرأت فيها رأي عالمنا الواضح في الحركة والسكون اذ كتب ما معناه :

« يبقى الجسم ساكنا أو يتحرك حركة مستقيمة منتظمة شرط أن لا يؤثر عليه أي عامل خارجي » •

كتب العبارة أعلاه في أوائل القرن الحادي عشر بينما لم ينشر غاليله أبحاثه ولم يؤلف نيوتن كتابه الا في غضون القرن السابع عشر

ومن هنا يبدو جليا التقدم العلمي المدهش الذي أحرزته حضارتنا العربية ، ولا أشك قط بأننا لو تمكنا من العودة الى تراثنا العلمي القديم لنهلنا منه غالبية المفاهيم الاساسية التي أتانا بها الميكانيك الكلاسيكي . اذ لا يعقل أن يصل عالم عربي فذ كابن سينا الى أدق المبادىء وأهمها في علم التحريك ثم يهمل بعدها هذا العالم في ظل حضارة متأججة قل أن شهدت البشرية مثيلا لها . لقد ترجمت غالبية مؤلفات ابن سينا وبقيت كتبه في علم الطب هي المؤلفات الوحيدة المقررة في جامعات أوربا قاطبة وذلك حتى أواخر القرن الثامن عشر . وما من شك أن كبار علماء أوربا في القرون الوسطى قد قرأوا ما كتبه عالمنا في أبحاثه الميكانيكية ولا يستبعد قط أن يكون كل من كبلر وغاليله ونيوتن قد قرأ مؤلفاته واستأنس بآرائه .

لنعد الآن بعد هذه المعترضة الى حيث تركنا نيوتن يفتش عن أسباب الحركة . يبقى الجسم ساكنا أو يتحرك حركة مستقيمة منتظمة اذا ما زالت القوى المؤثرة عليه . ولكن ما عساه يحدث لو أن القوى بقيت موجودة وما هو تأثيرها في العناصر الاساسية للحركة ؟ وقام نيوتن بالتجربة التالية : وضع فوق منضدة أفقية ملساء كرة صقيلة وتركها ساكنة في مكانها (سرعتها معدومة) ثم أثر عليها بصدمة معينة وتم له ذلك بواسطة الجهاز التالي : مطرقة يمكنها الدوران حول محور أفقي تسقط على الكرة من ارتفاعات مختلفة يقابل كل ارتفاع منها قوة صادمة تتناسب شدتها مع مقدار هذا الارتفاع (شكل ٧) . نرفع المطرقة الى ارتفاع معين ونتركها تسقط على الكرة . قبل الصدمة تكون الكرة ساكنة أي معدومة السرعة ثم تسقط عليها المطرقة ويدوم تأثير الصدمة فترة زمنية صغيرة لا متناهية في الصغر (د ز) وما أن تصدم الكرة حتى نراها تتحرك حركة مستقيمة منتظمة تقطع مسافات متساوية في أزمنة متساوية وتمكننا هذه المسافات المقطوعة من قياس سرعة



شكل ٧

الحركة • وتمثل السرعة المقاسة تغير سرعة الكرة في الفترة الزمنية (د ز) ونرمز لهذا المقدار بـ (د س) • وتعرف النسبة ($\frac{د س}{د ز}$) بتسارع الكرة وهو التسارع الناتج عن تأثير القوة الصادمة في الفترة الزمنية (د ز) •

وسمحت التجربة أعلاه بتحديد علاقة أساسية بين التسارعات المكتسبة والقوى الصادمة المسببة لهذه التسارعات ، ومكن الجهاز أعلاه نيوتن من اجراء تجارب عديدة مفيدة •

وضع كرة معينة على المنضدة وترك المطرقة تصدمها من ارتفاعات مختلفة فوجد أن التسارعات المكتسبة تكون كبيرة بقدر ما يكون الارتفاع الذي تسقط منه المطرقة كبيرا أي أن التسارعات التي يكتسبها جسم واحد معين تتناسب طردا مع القوى الدافعة •

واعتبرت النتيجة التجريبية أعلاه قانونا وعبر عنها بالعلاقة التالية :

$$\frac{ق}{ت} = \text{ثابت}$$

وقال نيوتن لا بد وأن يكون العدد الثابت هذا خاصة مميزة للمادة التي تتألف منها الكرة المدفوعة • فالكرة ساكنة وهي حرة لا تقيدها أية قوة ، ويقتضي منطق الامور أن يؤدي تأثير قوة مهما كانت صغيرة على الجسم الحر الى اكتسابه سرعة لا متناهية في الكبر • ويدل الـواقع التجريبي على عكس ذلك فالقوى الصغيرة تولد تسارعات صغيرة وبالتالي سرعا صغيرة والقوى الكبيرة تولد تسارعات كبيرة وبالتالي سرعا كبيرة ولا بد أن يكون عامل التنظيم بين القوى والتسارعات هي المادة الداخلة في تركيب الكرة ، والمادة قاصرة لا يمكنها أن تتحرك من تلقاء ذاتها ، ويقال بأن المادة عاطلة ؛ ويدعى الثابت أعلاه بثابت العطالة ويسمى أيضا « بالكتلة العاطلة » ويرمز له بـ (ك) ويكتب عندها القانون أعلاه على الشكل :

$$\frac{ق}{تـع} = ك$$

او

$$\boxed{ق = ك \times تـع} \quad (١)$$

وتعتبر العلاقة (١) القانون الاساسي في علم التحريك • وينظم هذا القانون العلاقة بين القوة المؤثرة على المادة والتسارع الناتج عنها ومتى علمنا تسارع المتحرك تمكنا من تعيين كافة عناصر الحركةويساعدنا في ذلك حساب التكامل •

الجاذبية العالمية :

القوة هي السبب القادر على تحريك الاشيـاء • فاذا وضعنا كرة ملساء على مستوى أفقي صقيل وتركناها وشأنها بقيت هذه الكرة في مكانها ساكنة دون حراك • ولكن بمجرد أن نميل المستوى بزاوية صغيرة نشاهد الكرة تتدحرج على المستوي المائل وتكون سرعتها صغيرة في

البدء ثم تزداد تدريجيا حتى يمكنها أن تبلغ قيمة لا بأس بها اذا كان المستوي المائل المفروض طويلا كفاية •

والناظر الى الكرة لا يستطيع أن يحدد نوع القوى المؤثرة عليها فهي قوى خبيئة مجهولة المصدر شغلت العقول المفكرة منذ القدم• ونظرا لاتجاه الاجسام الساقطة كلها نحو الارض اتفق العلماء على اعتبار هذه الاجسام متأثرة بقوى جاذبة تنتج عن تأثير مادة الارض في المادة الساقطة، وسميت هذه القوة الجاذبة بوزن الجسم •

كان نيوتن وهو في قريته يتأمل في هذه الافكار ويناقشها ، وما ان انتهى من دراسة الحركة ووضع قوانينها الرياضية وانتقل بعدها الـى دراسة التحريك ، بدا له واضحا أن الجسم المتحرك بحركة متغيرة لابد وأن يكون خاضعا لتأثير قوة أيا كان مصدرها • فالاجسام التي تسقط سقوطا حرا في الفضاء تتحرك ، كما أثبت غاليله ، حركة مستقيمة متسارعة باتنظـام •

وتتميز هذه الحركة عن سواها بتسارعها الثابت بالمنحى والجهـة والشدة ويبين القانون الاساسي في التحريك أن القوة المتسببة في هذه الحركة ينبغي أن تبقى أيضا ثابتة بالمنحى والجهة والشدة وهذه القوة هي قوة جذب الارض للجسم أو ثقل الجسم • فثقل الجسم هو اذا قوة شاقولية تتجه نحو مركز الارض • ولكن ما هي طبيعة هذه القوة ؟ كيف تنشأ وكيف تنتقل ؟ هذه هي الاسئلة التي راودت تفكير نيوتن وشغلته تماما عن باقي الامور • ويروى أن تفاحة سقطت عليه من أعلى شجرة كان يستلقي تحتها فكان سقوطها باعثا لاكتشاف نظرية الجاذبية العالمية • ويؤكد العالم الرياضي الشهير غوص Gauss أن تلك الرواية مختلقة من أساسها اذ يقول : « صدقوا هذه الرواية ان رغبتم انمـا الحقيقة هي : سأل أحد الطفيليين نيوتن أن يشرح له كيفية اكتشافـه

الجاذبية العالمية ؟ وبدء نيوتن في سرد المراحل الفكرية لنظريته الجديدة غير أنه ما لبث أن وجد في السائل شخصا أبلها لا يفقه من العلم شيئا فأراد أن يتخلص منه بلباقة فاختلق له رواية سقوط التفاحة » .

ولا يعرف تاريخ العلم نظريات علمية برزت لاصحابها فجأة فلا يعقل أن يكون سقوط التفاحة هو الباعث الحقيقي لاكتشاف الجاذبية العالمية . وينبئنا تاريخ العلم عن تجربات ونظريات عديدة بحثت في الجاذبيةوقطف نيوتن ثمارها الناضجة .

بدء الفلاسفة والعلماء دراساتهم الجدية في الجاذبية منذ القرن الثالث عشر بعد الميلاد . وهنالك مخطوطة للعالم بييردو ماريكور (Pierre de Maricourt) يعود تاريخها لعام ١٢٦٩ يشرح فيها هذا العالم ظاهرة استقطاب الاجسام المغناطيسية فيقول : « يعود سبب انجذاب قطب مغناطيسي الى آخر والتحامهما من جديد الى حرصهما الشديد على المغناطيسية من البعثرة أو الضياع » . وكتب العالم فراكستور (Fracastor) عام ١٥٥٥ ما يلي : « عند انقسام جسم ما الى قسمين يبعث كل واحد منهما نحو الآخر بغمامة من نوع خاص تنتشر في الفضاء المحيط بالقسمين وتعمل على اعادة التحام ما انفصم » .

ونشر العالم الانكليزي جلبرت (Gilbert) عام ١٦٠٠ كتابا في المغناطيسية ناقش فيه حركة الاجسام الثقيلة وعللها بكونها « اتجاها الى جمع الشمل » وأضاف موضحا « تنتج هذه الحركة في الواقع عن الميل الشديد نحو الاصل . ولا يقتصر هذا فقط على الاجزاء الموجودة على سطح الارض وانما يتعداه الى أجزاء الشمس والقمر وباقي النجوم ... وتشبه آلية سقوط هذه الاجسام نحو بعضها آلية انجذاب قطب مغناطيسي نحو قطب مغناطيسي آخر » .

وتأثر العالم كبلر بالافكار الفلسفية أعلاه اذ قال : « ليست الجاذبية

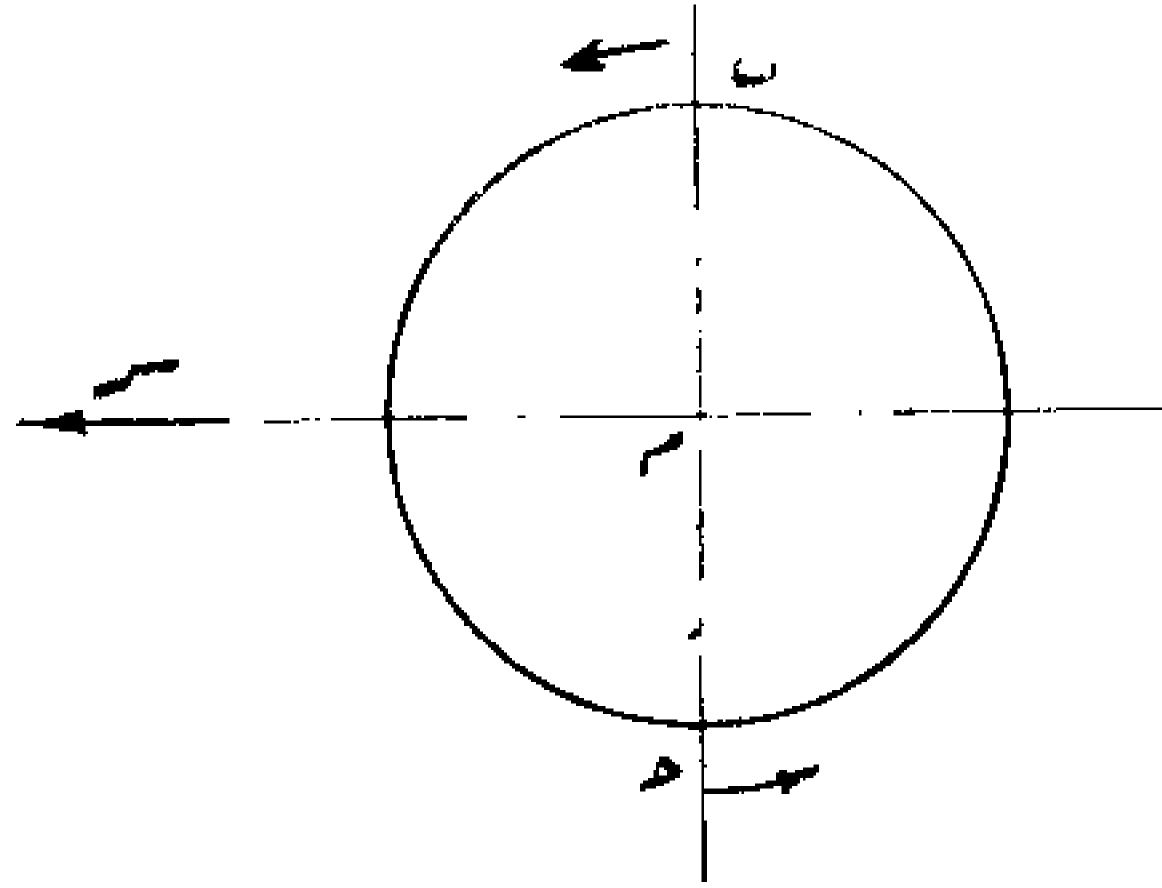
الارضية في الحقيقة سوى الفة متبادلة بين أجزاء النوع الواحد ، وتعمل هذه الالفة على جمع شمل ما انفصم » •

وأثارت ضمرتا المد والجزر انتباه علماء الفلك والميكانيك وناقشها العالم بطليموس فعزاها الى تأثير القمر في مياه البحار • وتناولها أيضا العالم العربي ابن رشـــد وأفرد لها بحثا خاصا توصل بنتيجته الى أن السبب الرئيسي في حدوث ظاهرتي المد والجزر يكمن في تأثير حرارة الاشعة الضوئية المنبعثة من القمر في مياه البحار •

وأخذ كبلر بآراء ابن رشد اذ قال : « تثبت التجارب أن الاجسام الرطبة تنتفخ عندما يصبح القمر بدرا وتتقلص عندما يعود هلالا » ثم عاد كبلر واستنكر ما قاله : « يؤثر القمر في ميـــاه البحر لان القمر والارض كلاهما من لبنة واحدة ، وتجذب مادة القمر مياه البحر بتأثير مغناطيسي فتحدث ظاهرة المد ••• وكذلك تنجذب مياه البحر نحو مركز الارض لاحتواء مادة الارض على الماء فتحدث ظاهرة الجزر ••• » ويقول كبلر في مكان آخر « لو لم يخضع كل من القمر والارض لتأثير قوة « حيوية » معاكسة لفعل الجاذبية لما بقي كل منهما على مداره بل لوقع القمر على الارض أو صعدت الارض نحو القمر كي يتم معه التحامهما• واذا امتنعت الارض عن جذب مياه البحار طافت عندها أمواج البحر على اليابسة وانطلقت نحو القمر » •

كما بحث العالم غاليله بدوره ظاهرتي المد والجزر ووجد فيهمـــا برهانا قاطعا لدوران الارض حول محورها •

« تدور الارض حول محورها من الشرق الى الغرب ، وتنتقل في الفضاء بحركة انزلاقية سرعتها (س) • ففي الوضع ب (شكل ٨) تضاف الحركة الـــدورانية للارض لحركتها الانزلاقية بينما تطرح في الوضع (حـ) الحركة الدورانية من الحركة الانزلاقية •



شكل ٨

وبالنظر لتصور مياه البحر فهي تقاوم الحركة بعطالتها فلا يمكنها أن تكتسب الحركة المحصلة لحظيا وتختلف بذلك سرعتها الذاتية عن سرعة اليابسة المجاورة لها ويؤدي هذا الاختلاف الى حدوث المد والجزر مرتين في اليوم الواحد » .

وسار مفهوم الجاذبية جنبا الى جنب مع مفهوم المد والجزر وبقيت تعليلات الجاذبية مشوبة بالآراء الميتافيزيكية فأتت غامضة متقلبة تشتمل على فكرة التأثير اللحظي عن بعد .

وأول من نادى بهذه الفكرة الجديدة هو العالم الانكليزي بيكون (Bacon) اذ قال : « ينتشر تأثير الجاذبية على الاجسام البعيدة وفق خطوط مستقيمة ، تماما كما تنتشر الاشعاعات الضوئية » .

وتأثر كبلر بهذا التشبيه ، وكان قد سبق للعالم الرياضي اوكليدس أن برهن أن شدة الاضاءة المنبعثة من منبع ضوئي تتحول عكسا مع مربع البعد عن هذا المنبع . فقال كبلر بأن الجاذبية تنتشر أيضا من جسم الى آخر وتؤثر عن بعد ويتناسب تأثيرها مع مربع البعد بين الجسمين ؛

فتؤثر الشمس على باقي الكواكب عن بعد بقوة جاذبة تتناسب عكسا مع بعد الشمس عن الكوكب •

وعندما عاد كبلر الى معادلاته الرياضية تبين له أن سرعة الكوكب على مداره تتناسب من جهة ، عكسا مع بعد الكوكب عن الشمس ومن جهة ثانية ، طردا مع القوة المحركة لهذا الكوكب ، أي قوة جاذبية الشمس •

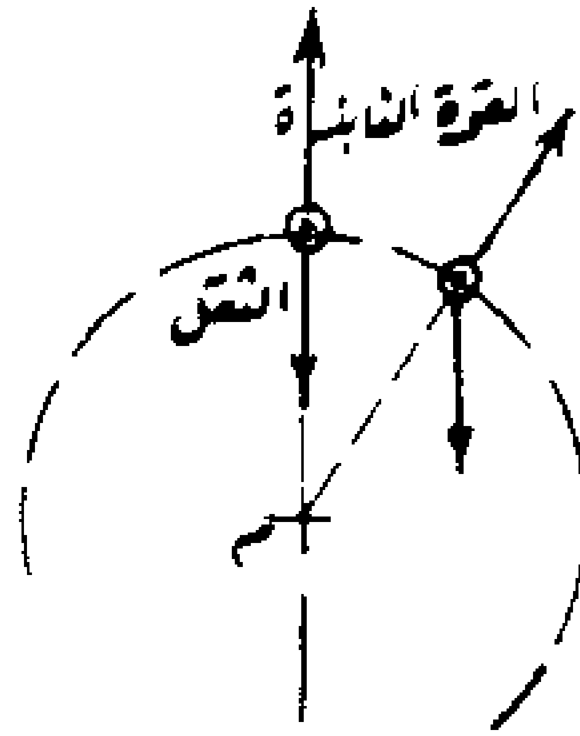
وبدمج العلاقتين وجد أن القوة الجاذبة المؤثرة على الكوكب ينبغي أن تكون متناسبة عكسا مع بعد الكوكب عن الشمس وليس مع مربع هذا البعد كما ظن • فعلل عندها الاختلاف بين الفرضين بقوله : « ينتشر الضوء في كافة اتجاهات الفضاء ، بينما يقتصر انتشار الجاذبية على المستوى الاستوائي للشمس ومن هنا كانت شدة الاضاءة تتناقص مع البعد أكثر من تناقص شدة الجاذبية » •

وكتب العالم بوليو Boulliau عام ١٦٤٥ : « تشبه الجاذبية العالمية الى حد بعيد ظاهرة انتشار الضوء وتتناسب شدتها عكسا مع مربع البعد » واعتبر بوليو قوة الجاذبية عمودية على جهة الانتشار •

وبحث العالم الايطالي بورلي Borelli في الجاذبية ، وعلل سبب عدم سقوط الكواكب على الشمس الجاذبة لها الى نشوء قوة تمانع في هذا السقوط وتنشأ هذه القوة نتيجة حركة الكوكب على مداره ، اذ شبه بورلي حركة الكوكب على مداره بحركة المقلاع (Fronde) وهو عبارة عن حجر ثقيل يربط بنهاية حبل متين وغير مرن ، تمسك اليد بطرفه الثاني ، ويدار الحجر فيرسم دائرة مركزها اليد ويبقى الحبل مشدودا أثناء الدوران ولا يقع الحجر رغم ثقله • وتعلل الظاهرة هذه بنشوء قوة ، تعاكس ثقله ، تتأتى عن الدوران وسميت هذه القوة فيما بعد بالقوة النابذة (شكل ٩) وتتجه القوة النابذة وفق نصف القطر

مبتعدة عن المركز وتتناسب شدتها طردا مع نصف قطر الدائرة ، وطردا مع مربع عدد الدورات في كل ثانية •

ونشر العالم هوك (Hooke) عام ١٦٧٤ نظريته في الجاذبية اذ قال : « تؤثر الكواكب بعضها في بعض بقوى جاذبة تتجه وفق الخط الواصل بين مركزي الكوكبين وتسمى هذه القوى المتبـادلة بقوى الجاذبيـة أو قوى الثقالة ؛ ولولا الثقالة لما احتفظت الكواكب بمادتها • وتؤثر



شكل ٩

كافة الاجرام السماوية ، بما فيها الشمس والنجوم ، على حركة الارض • وتؤثر الارض بدورها في حركة الشمس وحركة باقي الكواكب وتتناقص شدة القوى الجاذبة مع المسافة وتتناسب عكسا مع مربع البعد » •

ونشر العالم هويجنز (Huygens) عام ١٦٥٩ أبحاثه المتعلقة بطبيعة القوة النابذة • واستأنس العالم هالي (Halley) بهذه الابحاث وطبقهـا على الجاذبية العالمية ووجد عام ١٦٨٤ القانون الرياضي الذي أثبت التناسب العكسي لقوى الجاذبية مع مربع البعد •

وأظن أني بعد هذا الاستعراض السريع لتطور مفهوم الجاذبية قد توصلت نوعا ما الى اقناع القارىء الكريم أن اكتشاف نيوتن لقوانين

الجاذبية العالمية لم يكن نتيجة سقوط التفاحة من أعلى الشجرة ، وانما جاء نتيجة مناقشات علميـــة ودراسات وأبحاث دامت قرونا طويلة .
ولنفرض جدلا أن رواية سقوط التفاحة واقعية ، ما هي يا ترى المناقشة الفكرية التي قام بها نيوتن عند مشاهدته التفاحة تسقط ؟

لا بد أن يكون قد تساءل : ترى هل تسقط التفاحة نحو الارض فيما لو كان ارتفاع الشجرة عن سطحها مئة او الف مرة أكبر مما هو عليه ؟ وهذه القوة العجيبة التي تدفع بالاجسام جميعها نحو الارض هل تتجلى أيضا على بعد ألف أو مليون قدم عن الارض ؟ وهل تحافظ هذه القوة على قيمتها على هذه الارتفاعات الهائلة ؟ والقمر الذي يبعد عن الارض مسافة ٣٨٤٠٠٠ كيلو متر هل تؤثر فيه هذه القوة أيضا ؟ واذا كانت تؤثر فعلا ، لماذا لا يقع القمر على سطح الارض كما حدث منـــذ هنيهة للتفاحة ؟.

وبعد تأمل عميق يجيب نيوتن نفسه على ما طرحه من أسئلة فيقول : أنا الآن في الوادي فاذا أمسكت بالتفاحة بيدي وتركتها حرة أجدهـــا تسقط متجهة الى الارض . ولو صعدت الى أعلى الشجرة وتركتها أيضا من يدي لسقطت كذلك . ولو صعدت الى قمة الجبل وتركتها لوجدتها تسقط . ولو أطلقت قذيفة من بندقيتي نحو طائر يحلق الآن فوقي في الجو وأصبته لسقط الطائر على الارض . فالاجسام كلها اذا مهما كان نوعها ومهما كان ارتفاعها عن سطح الارض تسقط نحوها اذا تركت وشـــأنها .

كذلك اذا قذفت التفاحة من هنا في اتجاه أفقي فانها قد تصل الى مدى معين وبسرعة معينة .

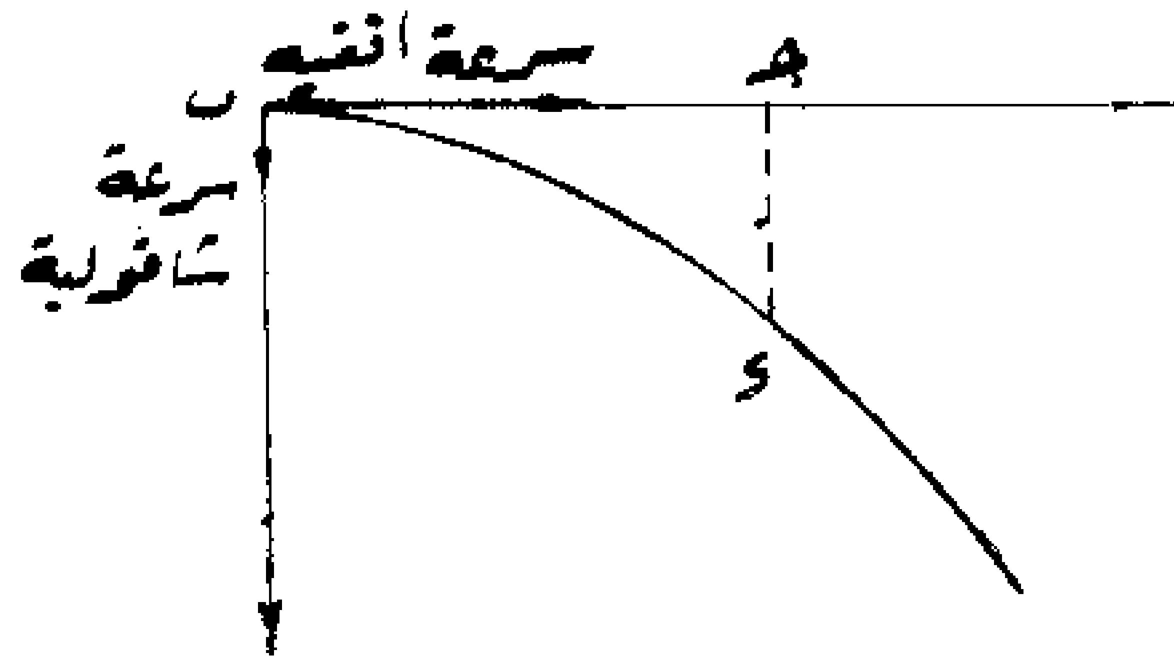
بينما لو قذفتها أفقيا من أعلى الشجرة لكان مداها أكبر وسرعـــة اصطدامها بالارض أكبر أيضا ، واذا قذفتها من أعلى قمة الجبـــل في

اتجاه أفقي نحو الوادي لبلغت مدى عظيما واصطدمت بالارض بسرعة كبيرة • ولكن ماذا يحصل لو تمكنت من الصعود الى ارتفاع قدره ٣٨٤٠٠٠ كيلو متر وقذفت هذه التفاحة من أعلاه في اتجاه افقي ؟ لاشك وان مداها في هذه الحالة سيكون هائلا ، سيكون أكبر بكثير من نصف قطر الارض فلا تسقط التفاحة على سطح الارض بل انها ولا شك ستقع في مكان ما من الفضاء الكوني •

واذا استبدلنا التفاحة بالقمر خضع هو أيضا لتأثير الثقالة الارضية وسقط نحو الارض الا أنه بالنظر الى ارتفاعه الشاهق فهو لا يقع على الارض وانما يقع في مكان ما من الفضاء الكوني • وتؤثر قوى الثقالة الارضية على القمر أثناء حركته وتغذي حركته ، ومفهوم تحت أو فوق من أرضنا لا يصلح بالنسبة للقمر اذ كيفما اتجه وأينما سار في حركته تكون الارض « تحته » وعليه ينبغي أن يكون المسار الذي يخطه هذا القمر في حركته مسارا مغلقا على ذاته ، ولا بد أن يكون مسارا شبيها بالدائرة أو بالقطع الناقص • ويبقى القمر على مداره لا يحيد عنه •

تلك هي المناقشة الفكرية التي كانت لتدور في رأس نيوتن فيما لو تأمل فعلا في سقوط التفاحة • وما ذكرناه أعلاه لن يعتبر سوى مجرد تخمين تنقصه البراهين الرياضية •

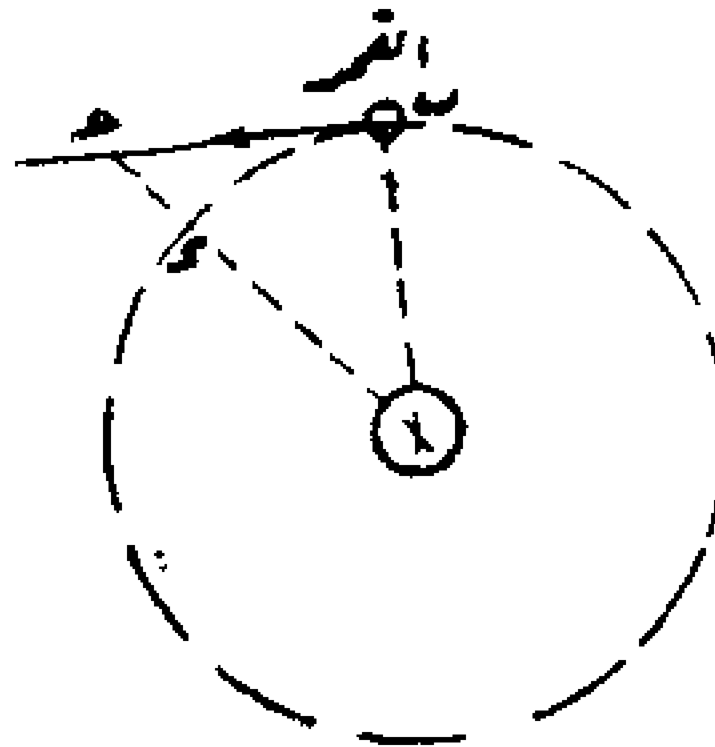
اذا قذفت التفاحة أفقيا وكانت بعيــدة تماما عن التأثير الجاذب للارض والكواكب تابعت سيرها على خط مستقيم بحركة منتظمــة • أما لو قذفت أفقيا بجوار الارض مثلا أثرت عليها عندها قوة الجاذبية وأكسبتها بالاضافة الى حركتها الافقية المستقيمة المنتظمة حركة شاقولية متسارعة بانتظام ، وتتركب الحركتان فتكون محصلتهما حركة منحنية تمثل بقطع مكافىء (شكل ١٠) • فاذا قذفنا التفاحة بسرعة (سر) من النقطة (ب) وكانت معزولة عن التأثير الجاذب الخارجي قطعت في ثانية



شكل ١٠

واحدة القطعة المستقيمة (ب حـ) • واذا لم تكن معزولة عنه قطعت في ثانية واحـــدة القوى المنحني (ب ء) والحركة المحصلة (ب ء) تتركب في الحقيقية من الحركة الافقية (ب حـ) والحركة الشاقولية (حـ ء) • تدل قوانين الحركة المستقيمة المتسارعة باتتظام أن المسافة الشاقولية المقطوعة في الثانية الاولى من الحركة تساوي نصف قيمة التسارع الناتج عـــن القوى الجاذبة • وطبق نيوتن هذه المعلومات على حركة القمر •

لو لم يكن القمر خاضعا لقوى الجاذبية الارضية لسار على مستقيم



شكل ١١

بحركة منتظمة وقطع مسافات متساوية في أزمنة متساوية وقد يقطع مثلا المسافة (ب حـ) في الثانية الواحدة (شكل ١١) واذا خضع القمر

لتأثير الجاذبية الارضية يبدل عندها مساره المستقيم بمسار منحني وقطع القوس (ب ء) في ثانية واحدة • وتكون المسافة « الشاقولية » التي يقطعها القمر في الثانية هي القطعة (حـ ء) التي ينبغي أن تساوي نصف قيمة التسارع الناتج عن قوة الجاذبية الارضية •

وأخذ نيوتن بالفكرة القائلة بتناسب قوى الجاذبية عكسيا مع مربع البعد عن الجسم الجاذب ؛ وحاول تطبيقها على حركة القمر • تبعد التفاحة عن مركز الارض مسافة تساوي نصف قطر الارض بينما يبعد القمر عن مركز الارض مسافة تساوي ٦٠ مرة تقريبـا نصف القطر ، فينبغي والحال هذه أن يكون تسارع القمر أصغر من تسارع التفاحة بما يقرب من ٣٦٠٠ مرة (٢٦٠) والبعد الشاقولي الذي يسقطه القمر على مداره ينبغي أن يكون أصغر من البعد الشاقولي لسقوط التفاحة بـ ٣٦٠٠ مرة في كل ثانية وقام بالحسابات الرياضية اللازمة •

وأدخل في حساباته قياس نصف قطر الارض كما ورد في قياسات **العالم نوروود** (Norwood) عام ١٦٣٣ ولكنه حصل بنتيجة الحساب على مدار للقمر لا يطابق مداره الحقيقي • وأصيب نيوتن بخية أمـل وترك الجاذبية وانصرف عنها لدراسة الضوء •

ولكنه لم ينفك عن التفكير فيها ، وكانت هذه هي طريقته في العمل اذ سأله يوما أحد أصدقائه : كيف تم له التوصل الى اكتشافاته ؟ فأجاب نيوتن « بأن أفكر بها على الدوام » •

وظل نيوتن يفكر في الجاذبية حتى عام ١٦٨٢ وفي أحد أيام العـام بينما كان يتوجه الى اجتماع الاكاديمية الملكية ، قال له أحد أصدقائه « هل سمعت بما توصل اليه العالم الفرنسي بيكار (Picard) ؟ لقد تمكن هذا العالم من قياس نصف قطر الارض بدقة كبيرة وحصل بذلك على رقم يخالف الرقم الذي وجده العالم نوروود • وسأله نيوتن بلهفة عن

الرقم الجديد • وأخذ قلمه على عجل وأعاد حساباته السابقة التي كان قد بدأها منذ أكثر من خمسة عشر عاما وأخذت الحقيقة تتجلى لناظريه تباعا وأخذ جسمه يرتجف ولسانه يتلعثم فطلب من صديقه أن يكمل له حلول معادلاته . وكانت الفرضية تتحول أمامه تدريجيا الى يقين • وحصل في النتيجة على مدار للقمر يطابق تماما المدار المشاهد وتم بذلك في شهر حزيران من عام ١٦٨٢ أكبر اكتشاف أنتجه العقل البشري • وبعد الاجتماع عاد نيوتن لعزلته مسترجعا أبحاثه الماضية في الجاذبية وتأكد له أن قوى الجاذبية تتناسب عكسا مع مربع المسافة وبقي عليه أن يستكمل عناصر هذه القوى •

قال تتناسب قوى الجاذبية عكسا مع مربع البعد ولكن ما علاقة هذه القوى بالجسم الجاذب من جهة وبالجسم المجذوب اليه من جهة أخرى ؟ لقد أثبت غاليله بتجارب فائقة الدقة أن الاجسام على اختلاف أنواعها تترافق في سقوطها في الفضاء (الخلاء) ؛ وهذا يعني أن الحركة المستقيمة المتسارعة بانتظام واحدة في كافة هذه الاجسام وتتساوى بالتالي التسارعات التي تكتسبها • وهذه الاجسام عاطلة بحد ذاتها لا يمكنها أن تتحرك تلقائيا واذا ما اكتسبت تسارعات فلا بد وأن تكون خاضعة لتأثير قوى دعوناها بقوى الجاذبية •

والجسم الجاذب هو الارض والاجسام المجذوبة تسقط نحو الارض وهذه الاجسام كائنة على مسافة واحدة عن مركز الارض فهل تتساوى القوى الجاذبة لها ؟

أخذ نيوتن مجموعة من الكرات الصقيلة تختلف في الشكل والمادة ، وتركها وشأنها لتسقط من ارتفاع معين فوجدها تترافق في سقوطها وتكتسب بالتالي تسارعات متساوية • ثم في تجربة ثانية وضع هذه الكرات على منضدة أفقية ملساء وطبق عليها صدمات متساوية فوجدها

تتحرك عـلى خطوط مستقيمة بحركات منتظمة ولكنها لا تترافق في حركتها فكانت بعض الكرات تكتسب سرعا أكبر من سرع الكرات الاخرى • وعدم ترافق هذه الكرات بحركتها الافقية يدل بوضوح على أن مقاومتها للحركة ليست واحدة أي أنها لا تملك عامل عطالة واحدة أو كتلة عاطلة واحدة ، والكتلة العاطلة للكرات السريعة تكون أصغر من الكتلة العاطلة للكرات البطيئة ، وباعتبار كتلة احدى الكرات واحدة للكتلة العاطلة يمكننا اعطاء كل كرة كتلة موافقة وتتناسب هذه الكتل عكسا مع السرع المكتسبة •

وفي سقوطها الحر تكتسب هذه الكرات سرعا متماثلة أي تسارعات متساوية ونظرا لتباين عطالتها ينبغي أن تكون القوى المحركة لها متباينة أيضا ومتناسبة طردا مع عطالتها •

وتجذب الارض الاجسام المختلفة الموجودة فوق سطحها بقوى غير متساوية وتعتمد هذه القوى على مادة الجسم المجذوب • ويوافق كل جسم عامل خاص به يدعى « بالكتلة الثقيلة » لهذا الجسم وتتناسب قوى الجاذبية طردا مع الكتل الثقيلة للاجسام المجذوبة وثابت التناسب هو التسارع المشترك لهذه الاجسام ويسمى بتسارع الثقالة الارضية •

القوة الجاذبة = الكتلة الجاذبة × تسارع الثقالة

وتسمى قوة جذب الارض للاجسام الواقعة على سطحها بوزن أو ثقل هذه الاجسام ، وتقدر هذه القوى كما أسلفنا بالكيلوغرام وتقاس تجريبيا بتعليق الجسم بنابض مدرج فيشير هذا النابض الى وزن الجسم • فاذا علقنا الكرات المستعملة في التجارب السابقة على التوالي بحلقة نابض مدرج أشار هذا النابض الى أرقام متباينة • تدل هذه الارقام على أوزان هذه الكرات وتتناسب هذه الارقام مع الكتل الثقيلة للكرات المعتبرة •

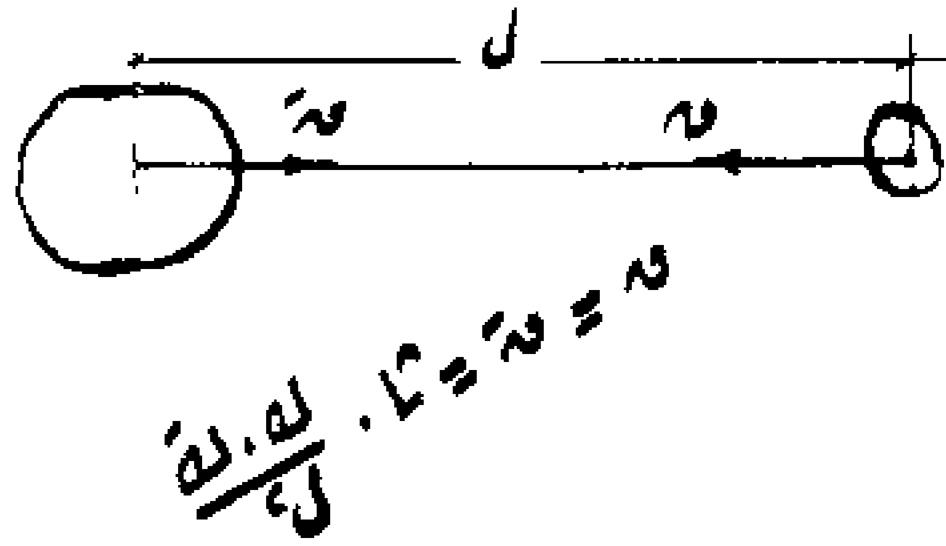
وتتناسب هذه الارقام أيضا من جهة ثانية مع السرع التي تكتسبها الكرات عندما تدفعها صدمة واحدة على المستوى الافقي ، فهي تتناسب اذا مع الكتل العاطلة للكرات .

وبعبارة أخرى بين الجاذبية والعطالة قاسم مشترك هو أنهما تشملان كافة الاجسام . فكل الاجسام مهما اختلفت طبيعتها هي في ذات الوقت « عاطلة » أي عاجزة عن تحريك ذاتها وعن تغيير حركتها « وثقيلة » أي تسقط على الارض عندما لا يعوقها عائق . والرقم الذي يحدد عطالة الجسم يتناسب مع الرقم الذي يحدد وزنه وبانتخاب مناسب للوحدات يمكن جعل الرقمين متساويين وهذا الرقم المشترك يعرف بكتلة الجسم . فالكتلة العاطلة والكتلة الثقيلة للاجسام يعبر عنهما برقم واحد .

فهنالك اذاً صلة بين الجاذبية والعطالة ، وتسقط كافة الاجسام على الارض بسرعة واحدة بغض النظر عن طبيعتها .

وتقبل نيوتن هذا التوافق العجيب بين التجاذب والعطالة كما هو من غير أن يفهمه أو أن يحاول تعليله . وظل هذا الامر مجهولاً حتى أوائل هذا القرن فلما أتى اينشتين وجد في الامر سرا ، فهو أكثر من أن يكون محض صدفة أو اتفاق عارض . وبعد مناقشة فكرية رائعة وضع مبدأ أساسيا يعرف اليوم بمبدأ التعادل بين الكتلة العاطلة والكتلة الثقيلة وسوف نعود الى بحث ذلك بالتفصيل في فصل النظرية النسبية العامة .

وكما تؤثر الارض على الاجسام المجاورة لها بقوى جاذبة كذلك ينبغي أن تؤثر هذه الاجسام بدورها على الارض بقوى جاذبة تساويها وتعاكسها (شكل ١٢) . ويفرض هذا التساوي وجوب تناسب قوى الجاذبية طردا مع كتلة الارض المجذوبة في هذه الحالة . ولخص نيوتن قانونه في الجاذبية العالمية على النحو التالي : « تتجاذب الاجسام تجاذبا



شكل ١٢

مباشرا فيؤثر كل جسم على الجسم الآخر بقوة جاذبة تتناسب طردا مع حاصل جداء كتلتي الجسمين وعكسا مع مربع البعد بينهما » .

ومكن قانون الجاذبية نيوتن من حساب كتل عدد كبير من الاجرام السماوية وساعد هذا القانون في التنبؤ عن ظواهر فلكية لم تكن معروفة قبلا ، كما كان صالحا لتعليل كافة الظواهر المشاهدة .

وأدخل نيوتن مفهوم القوى النسبية . فالاجسام لا تكون ثقيلة بحد ذاتها بل بعضها بالنسبة لبعض فثقل الجسم المقاس على سطح الارض هو محصلة القوى الجاذبة التي تؤثر بها الارض والشمس والقمر ... على هذا الجسم . ويتغير الثقل المقاس مع تبدل وضع الارض أثناء حركتها في الفضاء كما يتغير أيضا بحسب وضع الجسم ذاته بالنسبة للارض . فاذا نقل الجسم من خط الاستواء الى القطب تحول وزنه ، كذلك الامر فيما لو نقل الجسم من سوية سطح البحر الى قمة الجبل . ويمكن التحقق بسهولة من هذه الظاهرة بواسطة النابض المدرج .

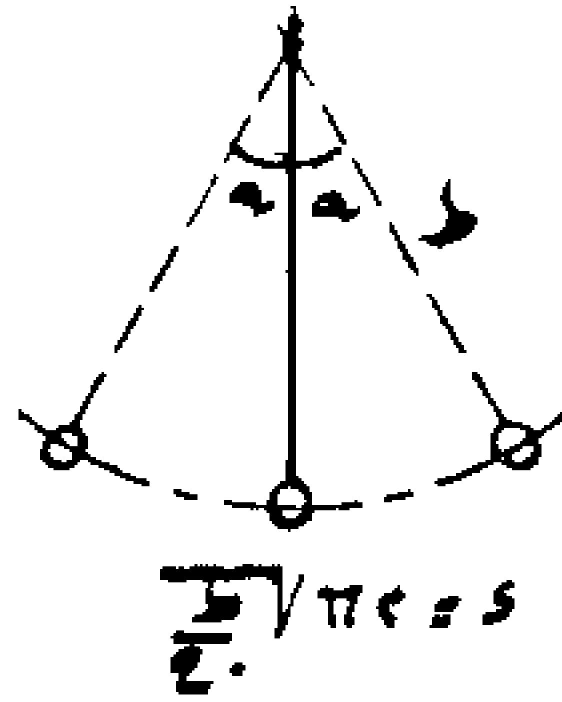
فثقل الجسم ليس مقدارا مطلقا وانما هو مقدار نسبي يعتمد على الوضع النسبي لهذا الجسم بدلالة الاجسام الاخرى . في حين تبقى كتلة الجسم (الكتلة العاطلة أو الثقيلة) ثابتة لا تتأثر مطلقا بوضع الجسم ولا بحركته .

ويؤدي تغير الثقل وثبات الكتلة الى تغير تسارع الثقالة (تسارع

الكتلة في سقوطها الحر) ويرمز لهذا التسارع بالحرف (ج) ويزداد تسارع الثقالة من خط الاستواء الى القطب • وتمكن نيوتن من ايجاد طريقة تجريبية لقياس هذا التغير وذلك بواسطة النواس البسيط •

كان العالم غاليله ، أول من وجه اهتمامه الى الحركة النوسية ، وذلك عندما حاول تقدير الزمن اللازم للثريا المدلاة من سقف المعبد في قيامها باهتزازة كاملة •

وطبق نيوتن قوانينه على دراسة الحركة النوسية • أخذ سلكا طويلا لا يقبل الفتل وغير مرن وعلق بطرفه كرة صغيرة وثقيلة وثبت طرفه الثاني (شكل ١٣) • في حالة التوازن يأخذ السلك استقامة الشاقول •



شكل ١٣

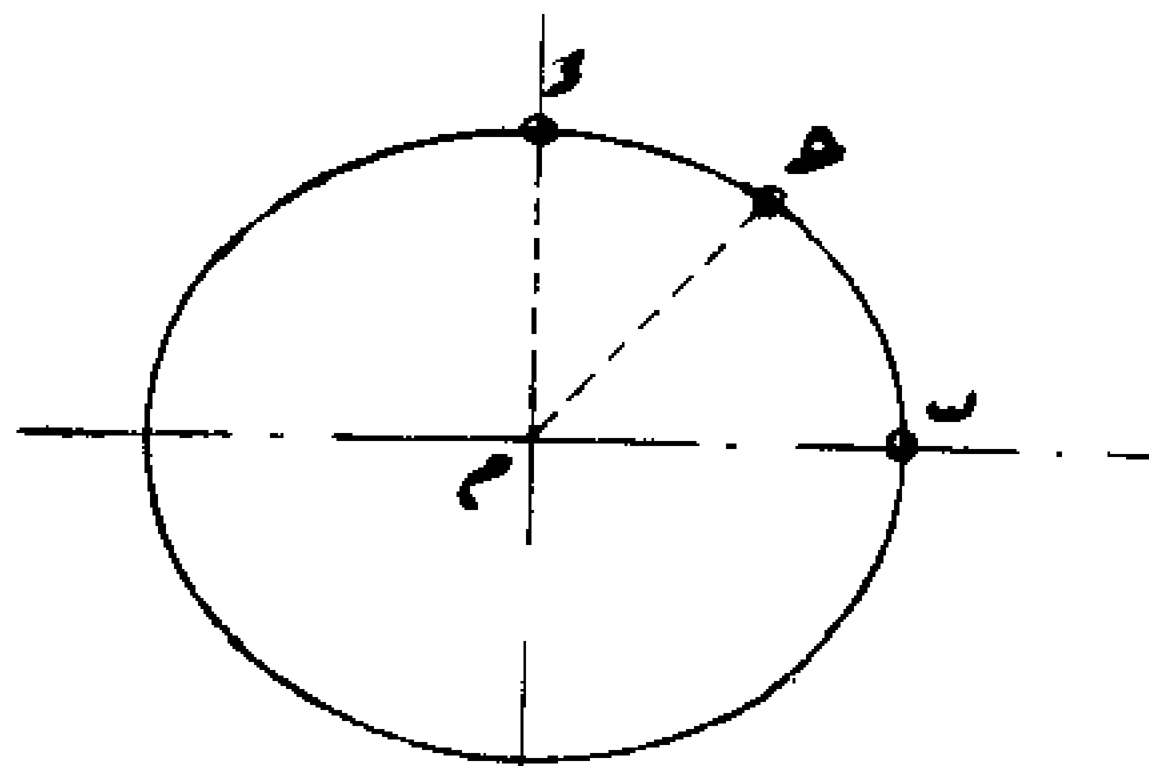
واذا ازيح عن وضعه زاوية صغيرة ، تحركت عندها الكرة على قوس دائرة مركزها نقطة التعليق ونصف قطرها طول السلك وقامت بحركة اهتزازية حول وضع الاتزان •وينتج عن تطبيق قوانين التحريك دستورا يحدد علاقة دور النواس (الزمن اللازم لاهتزازة كاملة) بطوله وبتسارع الثقالة في مكان الاهتزاز •

ويتناسب دور النواس طردا مع الجذر التربيعي لطوله وعكسا مع الجذر التربيعي لتسارع الثقالة الارضية (ج) •

ويعني ما تقدم ازدياد طول الفترة الزمنية ، اللازمة لاهتزازة كاملة من اهتزازات النواس بازدياد طول هذا النواس ، وبنقصان تسارع الثقالة الارضية .

فاذا نقلنا نواسا معينا من مكان الى آخر على سطح الارض وابقينا طوله ثابتا وقسنا في هذه الامكنة دور اهتزازه ، تمكنا بهذه الطريقة من تعيين قيمة تسارع الثقالة الارضية في المكان المعتبر وتحولاتها من مكان الى آخر . وتدل القياسات التجريبية ان دور نواس مفروض طوله ثابت يتناقص تدريجيا عندما تنقله من خط الاستواء نحو القطب حيث يبلغ في القطب قيمته الصغرى ونقول عندها ان تسارع الثقالة الارضية أصغري في خط الاستواء وأعظمي في القطب .

وناقش الميكانيك الكلاسيكي ظاهرة تزايد تسارع الثقالة الارضية من خط الاستواء الى القطب وعزاها الى عوامل عديدة منها عدم كروية الكرة الارضية . فالارض بيضوية الشكل ومفلطحة بجوار القطبين . وبسبب تفلطحها تصبح الاجسام المادية الموجودة في خط الاستواء ابعد عن مركز الارض من الاجسام المادية القريبة من القطب . ويؤدي هذا



م مركز الارض . (ب م > هـ م > ك م)

شكل ١٤

التباين في البعد الى تباين في قوى الجاذبية التي كما ذكرنا تتناسب عكسا مع مربع البعد (شكل ١٤) .

نشر كتاب « المبادىء » لنيوتن عام ١٨٨٧ وحوى كل ما ذكر في هذا الفصل بل اكثر مما ذكرنا بكثير ولا يتسع المجال هنا لشرح اوسع ، اذ ان الغاية من هذا الفصل هي المساعدة على تفهم أفكار ونظريات اينشتين .

وما ان نشر كتاب « المبادىء » حتى انصرف العلماء الى اجراء التجارب والقيام بالمشاهدات بغية التحقق من صحة النظريات والفرضيات الواردة فيه . واتت تجاربهم ومشاهداتهم كلها تأكيدا لما نشر ما عدا ظاهرة واحدة سنشرحها بعد قليل . واعتبر علم الفلك النظري الذي وضعه نيوتن انموذجا يحتذى في العلوم البحتة .

غير ان قانونا غايته الاساسية تحديد معالم الكون تحديدا صحيحا وكاملا لا يمكن ان يسمح بوجود ظاهرة شاذة . وقد لوحظ في الكوكب السيار عطارد (Mercure) اقرب كوكب للشمس ، انه لا يتبع في سيره قانون نيوتن في الجاذبية ، ولو ظهر شذوذ كهذا في كوكب آخر غير الكوكب السيار عطارد لما اثيرت من حوله ضجة كتلك التي اثارها العلماء حول شذوذ عطارد . فعطارد هو اقرب كوكب للشمس ويمكن ان يكون لقربه من الشمس اهمية خاصة تجعل الشذوذ الملاحظ ناجما عن خطأ مبدئي في قوانين نيوتن .

فاذا كان قانون التناسب العكسي مع مربع البعد مغلوطا او تقريبيا توجب عن ذلك حدوث فوارق كبيرة في المنطقة المجاورة للشمس ، وهذا هو بالضبط ما حدث لعطارد .

ولم تنجح كافة محاولات تلافي الخطأ وبقي هذا الشذوذ سرا عجيبا اكتنفه الغموض ما يزيد على قرنين . ولما اعلن العالم اينشتين نظريته العامة واستنبط منها نظرية جديدة في الجاذبية العالمية تختلف تماما من حيث الجوهر عن نظرية نيوتن ، وطبقت النظرية الجديدة على حركة الكوكب عطارد ، اعطت نتائج مدهشة اذ اتت موافقة تماما للظاهرة المشاهدة . وسوف نعود الى هذا الموضوع في فصل لاحق .

* * *

الفصل الثالث

الكون في نظر نيوتن

المكـان المطلق والزمـان المطلق :

ضمن نيوتن كتابه « المبادىء » القوانين الاساسية في علم التحريك ، وكان بعض هذه القوانين يعتمد بصورة مباشرة على اعمال سلفه غاليله .

ونحن مدينون لنيوتن ، قبل كل شيء ، كونه اضفى على التعاريف والقوانين شكلا عاما بسيطا جعله مستقلا كل الاستقلال عن المكـان والزمان الذي توضع فيه هذه القوانين . واضطر نيوتن قبل البـدء بمعالجة أي مبدأ ميكانيكي الى توضيح ومن ثم تثبيت فكرتي المكان والزمان . وكان دافعه الاول الى هذا العمل هو اعتماده المطلق على قانون العطالة الذي تكلم عنه كثيرا العالم غاليله .

وكان غاليله يدرس حركة الكرة الصقيلة على منضدة افقية ملساء ، فوجدها ترسم مستقيما تقطع عليه مسافات متساوية في ازمنة متساوية . نظر غاليله الى حركة الكرة من زاويته الخاصة فاعتبرها تقوم بحركة طبيعية مستقلة عن الناظر وانتهى من ملاحظاته التجريبية الى قانون عام ينبغي ان يصدق في كل مكان وزمان بتوفر بعض الشروط المناسبة .

وترجم نيوتن افكار غاليله بمعادلات رياضية ، عنـدما قال بان الشروط المناسبة التي ينبغي أن تتوفر في الجسم كي يتحرك حركـة مستقيمة منتظمة هي انعدام القوى المؤثرة عليه .

فالجسم الذي تنعدم القوى المؤثرة عليه يكتسب بالاستناد الى

القانون الاساسي في التحريك تسارعا معدوما أي سرعة ثابتة بالمنحى والجهة والشدة لذا وجب عليه ان يتحرك على مستقيم حركة منتظمة .

ولكن هل يصلح تطبيق المبدأ الاساسي في التحريك على تجربة غاليله ؟ وهل يحافظ هذا القانون على شكله البسيط في كل مكان وزمان ؟ هذه هي الاسئلة التي طرحها العالم نيوتن قبل وضع اسس علمه الجديد .

وظن غاليله ان الكرة التي تتدحرج أمامه ترسم مستقيما ، غير أنه تغاضى عن حقيقتين اساسيتين لو انه ادخلهما في حسابه لما تجرأ على الاتيان بقانونه . الارض كروية الشكل وينطبق الشاقول على نصف قطرها . فالمنضدة المجرب فوقها ليست مستوية بل هي جزء صغير من سطح الكرة ولا يمكن رسم مستقيمات على السطح الكروي . فالكرة التي تتدحرج على المنضدة امام ناظري غاليله ما كانت لترسم مستقيما وانما رسمت في الحقيقة خطا منحنيا قليل التكور ، اعتبره غاليله خطأ ، خطا مستقيما . كذلك الارض لا تبقى ثابتة في الفضاء وغاليله نفسه قاسى ما قاساه لمجاهرته بدورانها ، واذا أضفنا هذا العامل الجديد ، عامل الدوران الى العامل السابق ، عامل التكور ، لخلصنا منها بنتيجة لا تقبل الجدل ، وهي ان الكرة التي قال غاليله بأنها لا تخضع لتأثير أية قوة تتحرك حركة منحنية معقدة ، فلو أن غاليله تنبه الى هذه الحقيقة لبقي قانون العطالة الذي اشار اليه مجهولا .

وتنبه نيوتن الى الخطأ الذي وقع فيه سلفه غاليله ، وزاده هذا الخطأ تشبثا بآرائه ويقينا بصحة قوانينه ، فعاد بذاكرته الى تجربة غاليله والى المكان الذي اجريت فيه .

لقد اجرى غاليلة تجربته في غرفته وكانت الكرة محاطة بعدد لا متناهي من الاجسام المادية ، الارض وما عليها من أجسام ، الكواكب

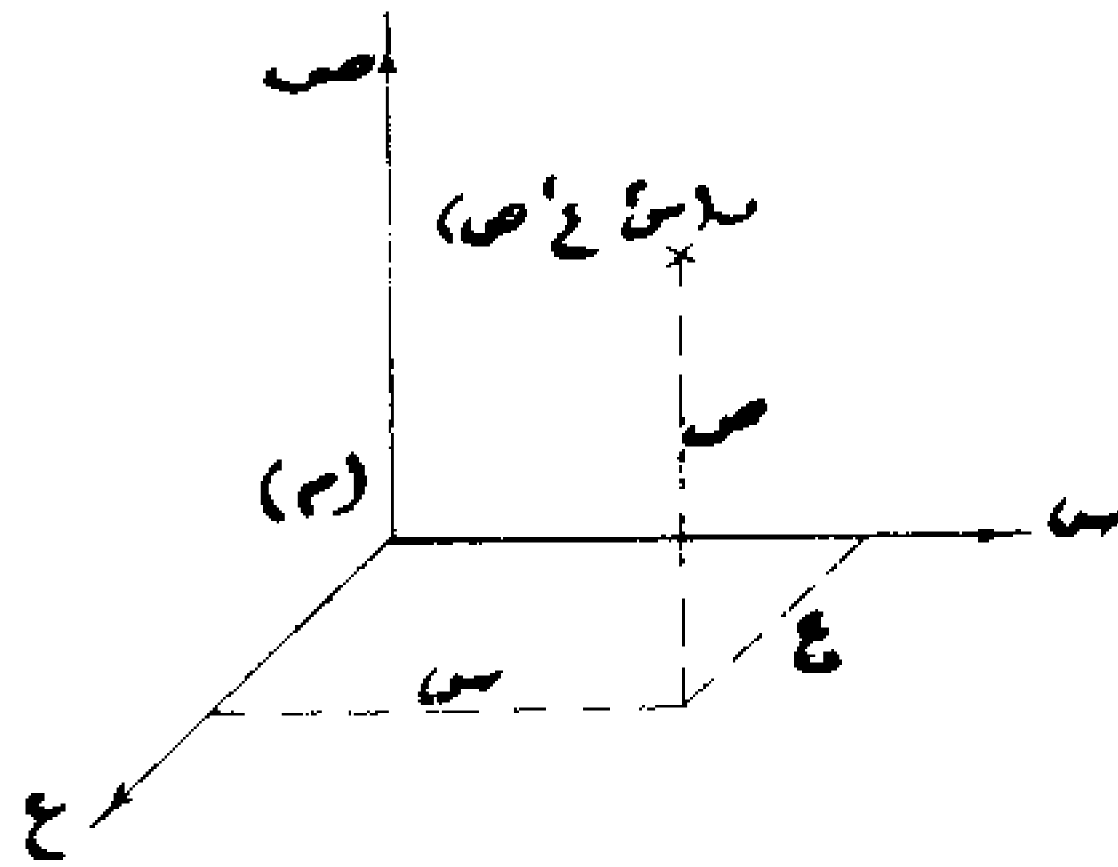
والنجوم ... وتؤثر هذه الاجسام على الكرة بقوى جاذبيه تتعلق بوضع الكرة بالنسبة لهذه الاجسام وبحركتها النسبية فلا يعقل والحال هذه ان نجزم بانعدام محصلة هذه القوى التي لا نعلم ولا يمكننا معرفة قياسها وتوزيعها . والكرة تتحرك . هذا على الاقل ما يشاهده غاليله ، وحركتها ليست مستقيمة منتظمة بدلالة غاليله نفسه وعليه ينبغي ان تتعرض أثناء حركتها المضطربة لقوى معينة .

وشبه نيوتن كرة غاليله بالمثال التالي : لنتخيل كرة من الحديد محاطة من كل الجوانب بمغانط صغيرة . فاذا تركنا هذه الكرة وشأنها لا يمكن أن تبقى ساكنة بل تتأثر بجاذبية المغانط التي تجذبها من جهات مختلفة بقوى مبعثرة فتتحرك هذه الكرة وترسم في حركتها خطا منحنيا معقد الملامح . واذا نزعنا بعض هذه المغانط وجدنا الحركة الجديدة أكثر انتظاما ، وبنزع كافة المغانط تسكن الكرة ، واذا دفعت دفعة صغيرة سارت على خط مستقيم لا يعوقها في سيرها هذا أي عائق فهي لذلك حركة مستقيمة منتظمة .

فحتى يسكن جسم من الاجسام أو حتى يقوم بحركة مستقيمة منتظمة يجب أن لا يخضع لتأثير أية قوة أي أن يكون معزولا عزلا تاما وكاملا ، عزلا مطلقا ، عن الاجسام المادية . ينبغي اذا أن يقع هذا الجسم في مكان من الكون خال تماما من الاشياء . واذا افترضنا جدلا امكانية الحصول على مكان « مثالي » يجب أيضا في هذه الحالة أن يبقى الناظر الى هذا الجسم ثابتا دون حراك وإلا ركبت حركة الناظر مع حركة الجسم وكانت الحركة المحصلة في الحالة العامة حركة منحنية ما .

وتدرس الحركة رياضيا بردها عادة ، كما ذكرنا ، الى جملة احداثية فراغية ، وهي عبارة عن ثلاثية فراغية متعامدة (س ع ص) . فنحن نعيد

حركات الاجسام التي ننظر اليها الى جملة مقارنة نعتبرها ثابتة • فاذا تحرك جسم أمامنا في الغرفة وأردنا دراسة حركته ورسم مساره أعدنا الاوضاع المتتالية التي يمر بها هذا الجسم الى ثلاثية فراغية متعامدة متصلة بغرفتنا ، كأن نعتبر زاوية من زوايا الغرفة مع أرضيتها مثلا • ويعين وضع الجسم بثلاثة احداثيات (س• ع• ص) (شكل ١٥) فلا



شكل ١٥

يصدق قانون العطالة على المشاهدات الارضية كما انه لا يصدق أيضا على المشاهدات التي تتم على سطح الكواكب أو في جوارها ويتحقق هذا القانون فقط في المكان « المثالي » الخالي من الاشياء في « المكان المطلق » • وتدرس حركة الاجسام في المكان المطلق بارجاعها الى ثلاثية فراغية متعامدة تتصل ببقعة من هذا المكان • وتدعى الجملة الاحداثية المتصلة بالمكان المطلق بالجملة المقارنة المطلقة •

يتحقق قانون العطالة في الجملة المقارنة المطلقة كما يتحقق فيها أيضا القانون الاساسي في التحريك الذي ينص على أن تسارع الحركة المردودة الى هذه الجملة يساوي ناتج قسمة القوى الخارجية المطبقة

على الجسم على كتلة هذا الجسم • وفي هذه الجملة أيضا تطبــق كافة القوانين الميكانيكية وخاصة ما يتعلق منها بالجاذبية العالمية • فالمدارات الناقصة التي ترسمها الكواكب السيارة هي قطوع ناقصة ترسم في هذه الجملة •

شعر نيوتن اذا بوجوب وجود جملة خاصة لا يصلح الميكانيك الذي وضعه الا بدلالتها وبقي عليه تحديد هذه الجملة وتعيين عناصرهــا • وتساءل : هل تتصل الجملة المطلقة بالارض أو بالشمس أو باحــدى النجوم ••؟ وكان جوابه بالنفي • كلا لا يمكن أن يتحقق قانـون العطالة على سطح الارض ولا على سطح الشمس ولا على سطح أي جرم سماوي • فالارض والشمس والكواكب هي أجسام مادية تؤثر في بعضها بقوى جاذبة تتغير بحسب مواقعها النسبية وحركاتها النسبية أيضا • فلا يمكن أن تتصل الجملة المطلقة بعالمنا الشمسي • لانهــا ينبغي أن تكون جملة ثابتة متصلة بمكان ثابت خالي من المادة • وبعد لأي، وبفرضيات عدة ، توصل تلامذة نيوتن بعد وفاته بقليــل الى اقتراح جملة مقارنة أسموها بالجملة الفلكية • اتجهت محاورها الثلاثية نحو نجوم بعيدة ثابتة وانطبق أحد مستوياتها على مستــوى المجرة (Voie lactée) • صدقت في هذه الجملة قوانين علم الفلــك وقوانين الجاذبية العالمية وسارت بدلالتها الكواكب السيارة على قطوع ناقصة تقع الشمس في أحد محارقها • وأصبحت جملة المقارنة المطلقة المقيدة بالمكان المطلق هي الجملة الفلكية وأطلق على محاورها اســم محاور كوبرنيــك •

فاذا نظرنا من فوق سطح الارض الى كوكب المريخ مثلا وأرجعنا أوضاعه المتتالية الى جملة مقارنة متصلة بالارض لوجدنا هذا الكوكب يرسم بدلالة أرضنا خطا منحنيا معقدا لا هو بالقطع الناقص ولا هو بالدائرة ، ويمكننا هذا الخط من دراسة حركة الكوكب بدلالة جملتنا

ومعرفة سرعته وتسارعه . فاذا أردنا وضع القوانين المحددة لحركته هذه لحصلنا على قوانين معقدة شتان ما بينها وبين القوانين التي تحدد حركة كوكب المريخ فيما لو أرجعنا هذه الحركة الى الجملة المقارنة الفلكية (المطلقة) كانت القوانين الجديدة أبسط مما هي عليه في حالة الجملة الارضية وعليه نقول : تأخذ القوانين الميكانيكية أبسط أشكالها عندما تصاغ في الجملة المقارنة المطلقة .

وعرف نيوتن نفسه المكان المطلق على النحو التالي :

« المكان المطلق يبقى بطبيعته مستقلا عن أي ارتباط بالاشيـاء الخارجية ويظل سرمديا لا حراك به مشابها دوما لذاته » .

وبعد أن تخلص نيوتن من معضلة المكان اضطرته قوانينه الى تحديد معالم « الزمان » الوارد في هذه القوانين ، والـذي يعرف « بالزمن المطلـق » .

الزمن الوارد في القوانين الميكانيكية هو زمن رياضي ينسـاب بانتظام فهو مقدار مستمر ينبغي أن يكون تابعا للحركة ، فحيث لا توجد حركة لا ينبغي أن يوجد الزمن وأصلح طريقة للتقديرات الزمنيةالرياضية هي الحركة المستقيمة المنتظمة ، فالمسافات المستقيمة المتساويـة تتطلب فترات زمنية متساوية ويؤول تقدير الزمن في الجملة المطلقة ، حيث تطبق قوانين التحريك ، الى قياس أطوال مستقيمة .

وفي الجمل المقارنة الاخرى تأخذ كما ذكرنا القوانين الميكانيكيـة أشكالا معقدة نوعا ما وتحوي هذه القوانين أيضا على الزمن الرياضي الذي ينساب فيها باستمرار فينبغي أن نفتش عن أجهزة تصلح لتقديرات زمنية متساوية لتأتي القوانين الميكانيكية موافقة للظواهر الطبيعيـة المردودة الى هذه الجمل .

لقد مر مفهوم الزمن بأطوار عدة • تناوله العلماء والفلاسفةالاقدمون وتأصل في أذهانهم • فالعلم منذ أرسطو حتى يومنا هذا يقـوم على افتراض وجود الزمن وجودا مطلقا وجودا منفصلا عن الاشياءوالحوادث والحركـة •

وتأثر نيوتن بأفكار أسلافه وردد معهم « بأنه ينبغي النظر للزمن بحد ذاته مقدارا رياضيا مجردا عن أي ارتباط بالمواضيع الخارجية وهو ينساب على نمط واحد بفضل طبيعته الخاصة » •

فاذا رغبنا تطبيق القوانين الميكانيكية بردها الى جملة مقارنة تتصل بالارض وجب عندها ايجاد جهاز يصلح لقياس الزمن جهاز يعتمد على الحركة اذ لا وجود للزمن بدون حركة ، جهاز تصلح الحركة فيه في تعيين فترات زمنية متساوية • وقد حاول الانسان منذ أقدم العصور الحصول على مثل هذا الجهاز فلجأ في البدء الى الساعات البيولوجية : نبضـات القلب وحركـة التنفس الـخ ••• وقد وجـد أن الفترات الزمنية المعرفة بهذه الساعات ليست متساوية • فانتقل منها الى ابتكار الساعات الرملية والساعات المعدنية التي اعتبرها تعريفا صالحا لتقدير فترات زمنية متساوية • وضبطت هذه الساعات على سـاعة دقيقة حبتنا بها الطبيعة وهي حركة دوران الارض حول محورها وانتقالها حول الشمس • وبدا لاول وهلة أن زمن الساعات أضبط الاوقـات وأحكمها ، ولكن هيهات ! فزمن الساعات ليس ثابتا ، والقول بثباته يراد به تنظيم حياتنا العملية ولكنه غير دقيق نظريا • واذا كانت الساعات المعدنية صالحة لقياس الاوقات القصيرة فهي لا تصلح لقياس الاوقات الطويلة • والايام ليست متساوية فالساعة الجيدة التي تسجل فرقا في اليوم الواحد قدره ثانية أو أقل تكفي للدلالة على تفاوت الايام الشمسية فيما بينها • فاليوم الواقع في ٢٣ كانون الاول يزيد باحدى وخمسين

ثانية عن اليوم الواقع في ١٦ ايلول • واستبدل اليوم الشمسي باليوم النجمي وكان يظن أن هذا اليوم ثابتا ، فشروق النجوم وغروبها هو أكثر انتظاما من شروق الشمس وغروبها ؛ ويعود سبب ذلك الى البعد الكبير للنجوم عن الارض • ومع ذلك فقد تبين أن اليوم النجمي هو أيضا بدوره عرضة للخلل لكونه يبقى معتمدا على دوران الارض في الفضاء وهذا الدوران ليس منتظما بل تعرقله عوامل عديدة منها قوة الاحتكاك الناجمة عن المد والجزر •

واعتبرت الثانية النجمية الوحدة المثلى للتقديرات الزمنية وقدر زمن القوانين الميكانيكية بالثانية النجمية وعلى مرور الايام ظهر عدم التطابق بين النتائج النظرية والظواهر المشاهدة واضطر العلماء الى ادخال بعض التصحيحات الزمنية • ويضع علماء اليوم الآمال الجسام على زمن يعتقدون بثباته المطلق وهو زمن اهتزاز الذرات المادية في ظروف طبيعية محددة •

الفصل الرابع

النسبية في الميكانيك الكلاسيكي

بعد أن عرف نيوتن الجملة المقارنة المطلقة المقيدة بالمكان المطلق انصرف الى التفتيش عن طريقة لتحديد مواقع وحركات الجمل الاخرى بدلالة الجملة المطلقة .

قال : الجسم المعزول عن كل تأثير خارجي يرسم بدلالة الجملة المطلقة مستقيما يقطعه بحركة منتظمة . وقد وجد غاليله قانونا مشابها عندما رد حركة كرته الى جملة مقارنة مقيدة بزاوية من زوايا غرفته . نعم لقد أخطأ غاليله عندما اعتبر المسار مستقيما وهذا الخطأ صغير جدا لا تمكننا من تقديره أدق الاجهزة المستعملة ويمكن حذفه تماما اذا اعتبرنا سطح الارض في مكان التجربة سطحا مستويا يحمل كل خصائص هندسة اوكليدس ، وان الارض لا تقوم بحركة دائرية بدلالة الجملة المطلقة بل تقتصر على حركة انتقالية . في مثل هذه الحالة يصح لنا أن نقول بأن قانون العطالة يطبق على سطح الكرة الارضية ، واذا صح قانون العطالة صحت بالتالي معه كل القوانين التحريكية المعبرة عن ظواهر طبيعية تجري على سطح الارض وأخذت هذه القوانين أشكالا بسيطة تماثل الشكل الذي وضع لها بدلالة الجملة المطلقة .

فاذا درسنا السقوط الحر للاجسام على سطح الارض وجدنا قانونا مماثلا للقانون الرياضي الذي وضعه نيوتن في الجملة المطلقة ، فهل يعني ذلك أن الارض تشكل بقعة صغيرة من المكان الخالي والمطلق ؟ واذا لم يكن الامر كذلك فكيف نعلل اذا تماثل القوانين الميكانيكية

المترجمة عن الظواهر الطبيعية في الجملتين ، الجملة المطلقة وجملة الارض ؟ .

ذكرنا أن الارض ليست ثابتة في الفضاء وهي على حد معرفتنا تقوم على الاقل بحركتين حركة دورانية حول محورها وحركة دائرية حول الشمس . ولكن لو تخيلنا الارض مغطاة بطبقة من الغيوم تمنع عنها أشعة الشمس وأضواء النجوم لما تمكنا في هذه الحالة من الاطلاع على ظاهرة الدوران ، ولظننا أن الارض ثابتة في مكانها تؤلف قطعة من المكان المطلق الثابت .

ونحن في حالتنا الحاضرة لا نشعر بحركة الارض كما لم يشعر بها أسلافنا وهذا ما دعا علماء الفلك الاقدمون الى اعتبار الارض ثابتة والنجوم والكواكب السيارة تدور من حولها ، ووضعوا قوانين فلكية تعتمد على هذه الخاصة ووفقوا في تعليل عدد كبير من الظواهر الفلكية على أساسها . ثم أتى كوبرنيك ومن بعده كبلر وغاليله وفرضوا الحالة المعاكسة اعتبروا الشمس ثابتة والارض تدور حولها ووضعوا القوانين المناسبة فأتت قوانينهم أبسط من القوانين القديمة ونجحت في تعليل عدد أكبر من الظواهر الفلكية .

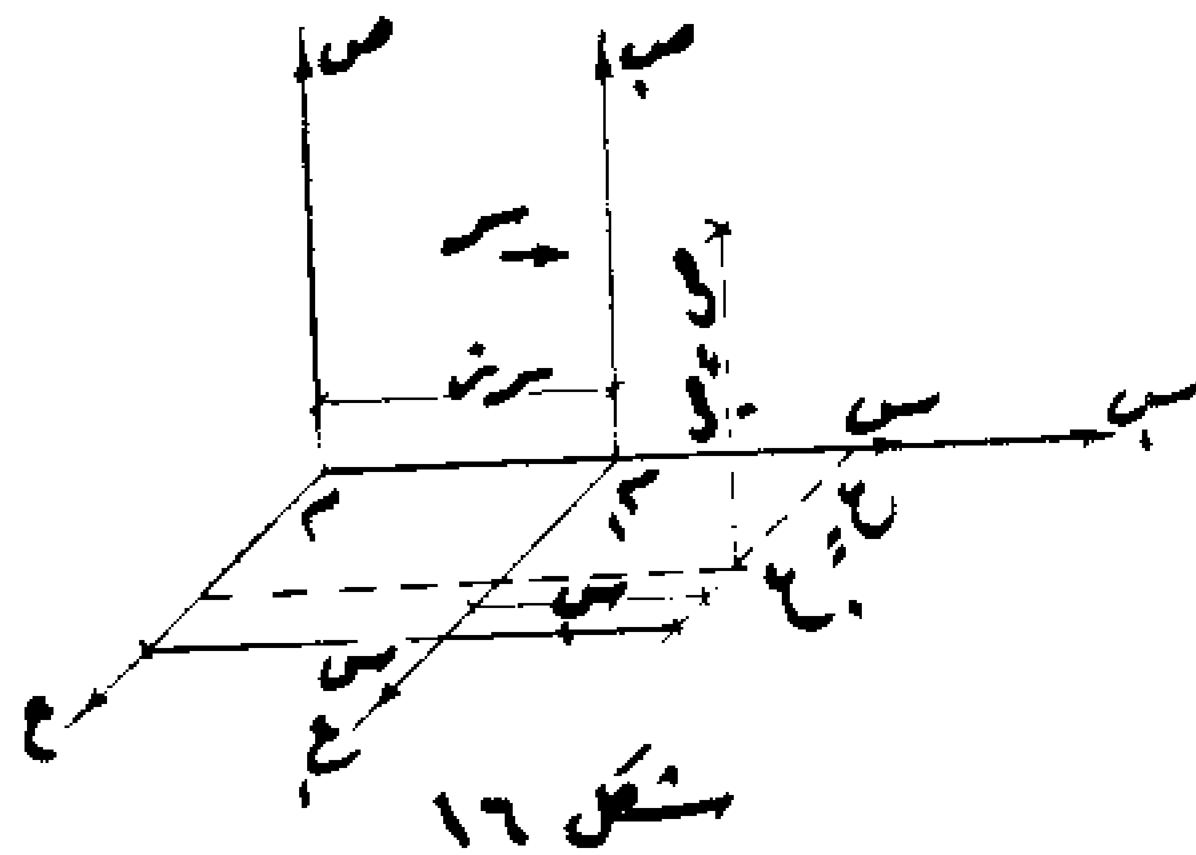
وأخيرا أتى نيوتن وفرض جملته المطلقة الثابتة وكانت الاجرام السماوية كلها تتحرك بدلالة هذه الجملة ، ووضع القوانين الفلكية الموافقة فأتت هذه القوانين على شكل أبسط بكثير من سابقاتهاونجحت في تعليل كافة الظواهر الفلكية المعروفة وتنبأت عن عدد كبير لم يكن معروفا بعد .

ولم يذهب نيوتن الى الجملة المطلقة ولم يجر تجاربه فيها ، بل أجرى التجارب على سطح الارض ووضع قوانينه بدلالة جملة مقارنة مقيدة بها ، وبعدها عمم النتائج التي توصل اليها على الاجرام السماوية

ورفع قوانينه الارضية الى مصاف القوانين المطلقة . فنيوتن لم يأبه بحركة الارض كما لم يأبه بها غاليله من قبله . وقد أورد غاليله تعليلا لحتمية تماثل القوانين الميكانيكية بين جملتين تتمتعان بحركة نسبية قال : لو جلست في سفينة تمخر عباب ميـاه بحيرة راكدة بحركة مستقيمة منتظمة ووضعت أمامي على المنضدة كرة ملساء لبقيت هذه الكـرة ساكنة واذا دفعتها دفعة خفيفة الى الامام سارت على خط مستقيم قاطعة مسافات متساوية في أزمنة متساوية . كذلك لو تركت الكرة حرة في فضاء غرفة السفينة لوجدتها تسقط نحو أرضية الغرفة عـلى مسار شاقولي وتقوم بحركة مستقيمة متغيرة بانتظام . والتجارب المذكورة تحددها ذات القوانين التي كنت لاحصل عليها فيما لو أجريتها في غرفة مكتبي على اليابسة ولا يمكن لهذه التجارب أن تخبرني شيئا عن حركتي الحالية . وعبر نيوتن عن أفكار غاليله تلك بالعبارة التالية : « تـأخذ القوانين الرياضية المترجمة لظواهر طبيعية معينة شكلا مماثلا في كـافة الجمل المقارنة التي تتحرك بدلالة بعضها حركة مستقيمة منتظمة » .

ونمكن نيوتن من برهان ذلك رياضيا .

تخيل جملتين احداثيتين (س ع ص) و (س ١ ع ١ ص ١)



شكل ١٦

محاورها متوازية تتحركان حركة نسبية مستقيمة منتظمة بسرعة سر • نفرض أن مبدأي الجملتين منطبقان في اللحظة (ز = صفر) وأن حركة الجملة ($م_{١}$) تتم في الاتجاه الموجب للمحور (س) (شكل ١٦) • نعتبر نقطة (ب) احداثياتها في الجملة ($م_{١}$) هي ($س_{١}$ و $ع_{١}$ و $ص_{١}$) في اللحظة $ز_{١}$ مقدرة في الجملة ($م_{١}$) ولننظر الى النقطة من الجملة (م) في اللحظة ز مقدرة في هذه الجملة :

في اللحظة ز = صفر كان المبدءان منطبقين وتتحرك الجملة ($م_{١}$) بدلالة الجملة (م) بحركة مستقيمة سرعتها سر تتجه نحو الجهة الموجبة للمحور (س) • في اللحظة ز يصـل المبدأ ($م_{١}$) الى نقطة فاصلتها س = سر ز أما الاحداثيتان ع و ص فتكونان معدومتين وتفيـدنا نظرية انتقال المحاور الاحداثية في حساب احداثيات النقطة (ب) بدلالة الجملة (م) •

$$س = س_{١} + سر\,ز \;،\; ع = ع_{١} \;،\; ص = ص_{١} \qquad (١)$$

فاذا تحركت النقطة (ب) بتغير الزمن كانت سرعتها شعاعا يمكن تحليله على المحاور الاحداثية الثلاثة • ومركبات هذا الشعاع على هذه المحاور هي :

أ) على محاور الجملة ($م_{١}$) $س'_{١} \;،\; ع'_{١} \;،\; ص'_{١}$

ب) على محاور الجملة (م) $س' \;،\; ع' \;،\; ص'$

وباشتقاق المعادلات (١) بدلالة الزمن ينتج :

$$س' = س'_{١} + سر \;،\; ع' = ع'_{١} \;،\; ص' = ص'_{١} \qquad (٢)$$

وتدل العلاقات (٢) أن مركبة شعاع سرعة النقطة (ب) على المحور (س) من الجملة (م) لا تساوي مركبة شعاع النقطة (ب) مردودة الى الجملة ($م_{١}$) وعلى المحور $س_{١}$ بينما تتساوى مركبات شعاعي السرعتين على المحورين ع ، $ع_{١}$ و ص ، $ص_{١}$ • وينتج عن ذلك أن سرعة النقطة

(ب) كما ترى من الجملة ($م_1$) لا تساوي سرعة هذه النقطة اذا ما نظر اليها من الجملة (م) •

واذا اشتققنا العلاقات (٢) بدلالة الزمن حصلنا على مركبات تسارعي النقطة (ب) بدلالة الجملتين (م) و ($م_1$) :

$$س'' = س_1'' ؛ ع'' = ع_1'' ؛ ص'' = ص_1'' \quad (٣)$$

وتبين العلاقات (٣) تساوي مركبات التسارعين وبالتالي تساوي تسارعي النقطة (ب) اذا ما نظر اليها من الجملتين (م) و ($م_1$) •

واذا تساوى تسارعا النقطة (ب) بدلالة الجملتين (م) و ($م_1$) كان ذلك يعني تساوي القوى المؤثرة على النقطة (ب) •

فالحركة المستقيمة المنتظمة للجملة لا تولد في النقط أو الاجسام الموجودة فيها قوى اضافية •

فاذا تخيلنا جسما رد الى الجملة المقارنة المطلقة وكانت القوى المؤثرة على هذا الجسم كما ترى من هذه الجملة معدومة ، تحرك هذا الجسم في الجملة المطلقة حركة مستقيمة منتظمة • ولو نظرنا الى الجسم المفروض من جملة مقارنة ثانية تتحرك بدلالة الجملة المطلقة حركة مستقيمة منتظمة لما تبدل توزيع القوى على الجسم وبقيت محصلتها معدومة ونتج عن ذلك سلوك الجسم مسارا مستقيما في هـذه الجملة ، يقطعه بحركة منتظمة • والنتيجة الرياضية الهامة لهذه الدراسة تكمن في أن الحركة المستقيمة المنتظمة للجملة بدلالة الجملة المطلقة لا يمكن أن تؤدي الى نشوء قوى جديدة • فالظواهر الطبيعية التي تجري في جملة كهذه لا يمكن أن تؤثر فيها الحركة المستقيمة المنتظمة لهذه الجملة وتبقى هذه الظواهر ممثلة بقوانين تطابق تماما القوانين التي تمثلها في الجملة المقارنة المطلقة •

واستنبط نيوتن من المناقشة أعلاه مبدأ أساسيا عرف فيما بعد بمبدأ النسبية في الميكانيك الكلاسيكي .

ونصه : « لا يمكن بتجارب ميكانيكية ـ تجري في جملة تتحرك بدلالة المكان المطلق حركة مستقيمة منتظمة ، الوقوف على حقيقة حركة الجملة » .

فاذا أجرينا تجارب ميكانيكية في جملة تتحرك بدلالة الجملة المطلقة حركة مستقيمة منتظمة ، حصلنا عندها على قوانين مشابهة تماما لقوانين الجملة المطلقة ، وفي هذه الحالة يحق لنا أن نؤكد بثبات جملتنا وأن نعتبر ما تبقى من الجمل ومن بينها الجملة المطلقة كلها متحركة .

ويحق لغاليله الجالس في غرفة السفينة أن يدعي بأن سفينته ثابتة والشاطىء يتحرك بدلالتها حركة مستقيمة منتظمة ، تماما كما يحق للجالس على الشاطىء أن يؤكد ثبات اليابسة وحركة السفينة بدلالتها حركة مستقيمة منتظمة .

والحجر الذي يسقط سقوطا شاقوليا على شاطىء البحيرة يراه غاليله من سفينته يرسم خطا مكافئا ، تماما كما يرى الشخص الجالس على الشاطىء الحجر الذي يسقط شاقوليا في غرفة سفينة غاليلة ، يرسم خطا مكافئا .

وكل من الاثنين محق فيما يدعيه وكل ما يمكن أن يتفقا عليه هو أن السفينة والشاطىء هما في حالة حركة نسبية ، أما أيهما المتحرك فهذا شيء لا يمكن أن يتفق عليه .

هنالك اذاً لا نهاية من الجمل المقارنة التي تتصف بصفات الجملة المطلقة وكل هذه الجمل تتحرك بدلالة الجملة المطلقة بحركة نسبية مستقيمة منتظمة . وأطلق الميكانيك الكلاسيكي على هذه الجمل

المتكافئة اسم « الجمل العطالية » (لان قانون العطالة يصــدق فيها جميعــا) •

ويصبح عندها النص الجديد لمبدأ النسبية على النحو التالي :

« لا يمكن الوقوف على حقيقة حركة الجملة العطاليــة بتجارب ميكانيكية تجري في هذه الجملة » •

ونزع مبدأ النسبية عن « المكان المطلق » المركز المرموق الخاص الذي كان يتمتع به فقد ساوى بينه وبين كافة الجمل التي تتحرك بدلالته حركة نسبية مستقيمة منتظمة • فالمكان المطلق لم يعد بنظر النسبيــة الكلاسيكية ذلك المكان السرمدي الثابت بل من الممكن لناظر موجود في جملة عطالية أن يدعي ، ويكون ادعاؤه مقبولا ، بأن الجملة المطلقة تتحرك بدلالته •

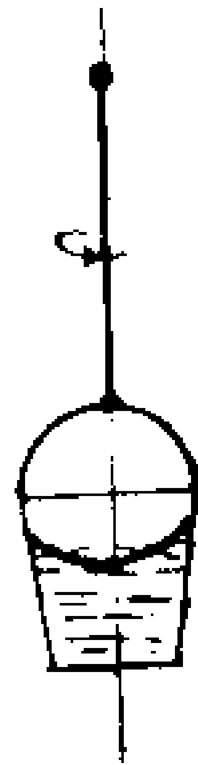
وتنبه نيوتن الى هذا التناقض الصارخ ، بين تعريفه للمكان المطلق من جهة ، وبين مبدأ النسبية من جهة ثانية • الا أنه عاد وقال : الحركة المستقيمة والمنتظمة هي حركة لا يقرها واقعنا الطبيعي فهي لا يمكن أن تحدث الا في المكان المعزول والخالي من الاشياء والحركة في الكون هي حتما متغيرة • ويمكن تحديد الحركة المتغيرة بدلالة المكان المطلق وذلك لان القوانين الميكانيكية لا تأخــذ في الجمل المقارنة المتحركة بحركة متغيرة أشكالا مماثلة لاشكالها البسيطة في الجملــة المطلقة أو الجملة العطالية • فاذا جلسنا في سفينــة ووضعنا على منضدة أفقية أمامنا كرة ملساء تبقى الكرة في مكانها ساكنة طالما بقيت السفينة ساكنة أو سارت بحركة مستقيمة منتظمة بدلالة مياه البحر الهادئة • ولكن بمجرد أن تغير السفينة سرعتها أو تدور فوق سطح الماء نلاحظ الكرة تأخذ تلقائيا بالحركة وتكون هذه الحركة مضطربة معقدة واذا حللنــا القوى الحقيقية المؤثرة على الكرة لوجدناها متعاكسة مباشرة ليس لها

محصلة . وفي هذه الحالة ينبغي لتعليل الحركة افتراض وجود نوع خاص من القوى نسميها بالقوى الظاهرية ونرجع نشوءها الى حركة الجملة المقارنـــة .

فهنالك اذاً تجارب ميكانيكية اذا ما أجريت في جمل متحركة أمكن لها تحديد حركة هذه الجمل بدلالة المكان المطلق .

وقد أورد نيوتن المثال التالي :

نعلق دورقا بسلك طويل جدا وندير هذ الدورق حول السلك في اتجاه ثابت (شكل ١٧) ونوقف الدوران عندما يصبح السلك مفتولا كفاية . نضع عندها في الدورق ماء الى سوية معينة ثم نترك الـــدورق وشأنه فيأخذ بالدوران في اتجاه معاكس ويدوم الدوران طالما بقي السلك



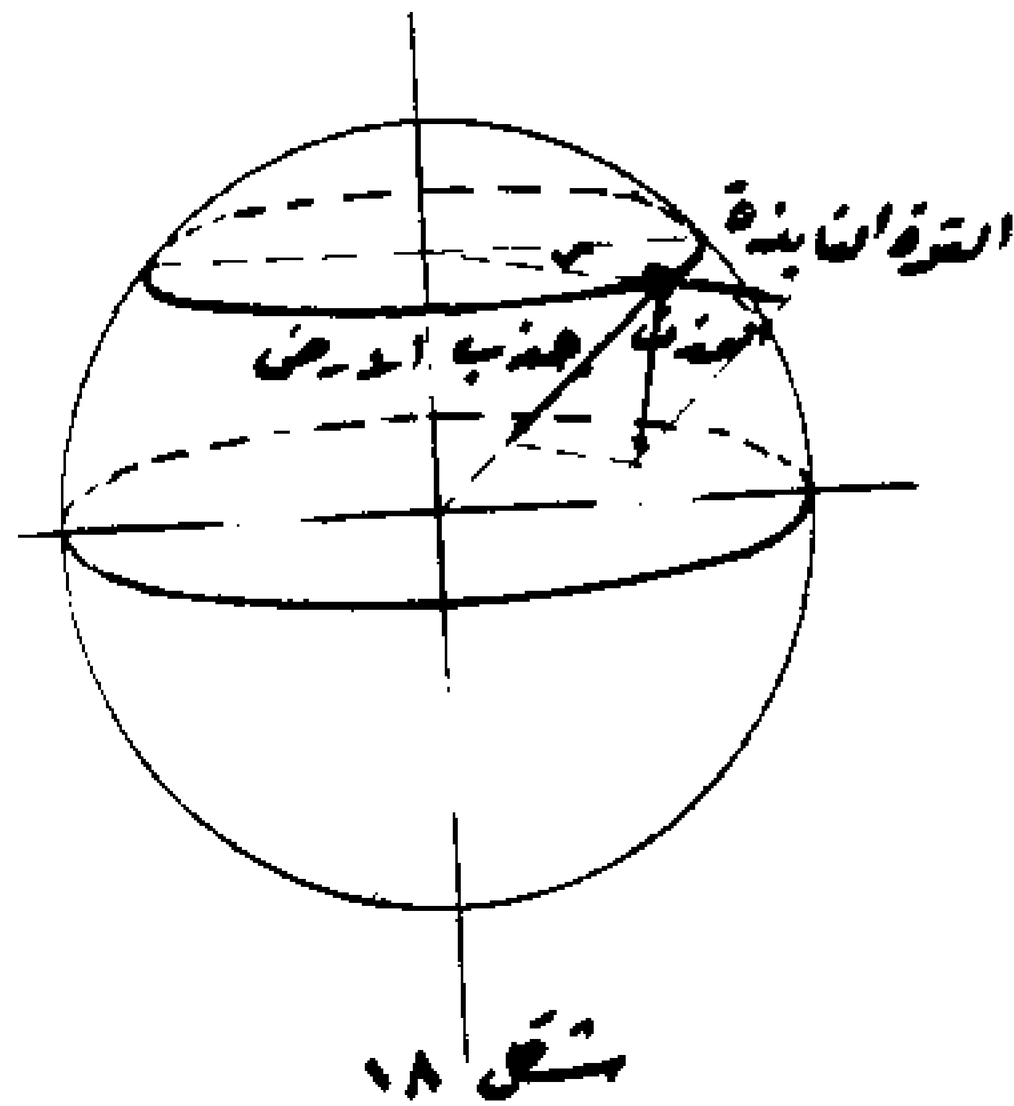
شكل ١٧

مفتولا . في بدء الدوران تكون سرعة الماء بالنسبة لجوانب الدورق عظمى (الدورق يدور والماء ثابت) واذا نظرنا الى سطح الماء وجدناه مستويا . وبنتيجة احتكاك الماء بجوانب الدورق ، تنتقل حركة الدوران من الدورق الى الماء وذلك بصورة تـــدريجية وتتضاءل معها السرعة

النسبية بين الماء والدورق ؛ واذا نظرنا عندها الى سطح الماء في الدورق وجدناه مقعرا نحو الاعلى أي أن جزئيات الماء تبتعد عن محور الدوران ويتم ذلك نتيجة تأثير قوى نسميها بالقوى العطالية أو القوى النابذة • وتدل هذه التجربة أن القوى النابـــذة لا تتولد عن الحركة الدورانية النسبية وانما فقط عن الحركة الدورانية الحقيقية أي عن حركة الدوران الفعلية للماء وليس عن حركته النسبية بدلالة الدورق •

فاذا نظرنا من الآن وصاعدا الى سطح الماء ووجدناه مقعرا ولــم نجد القوى الحقيقية المولدة لهــذا التقعر جزمنا عندها أن الماء هو في حالة حركة دائرية حقيقية ويزداد التقعر بازدياد سرعة الدوران ، ويتولد هذا التقعر نتيجة قوى عطالية نسميها بالقوى النابذة • •

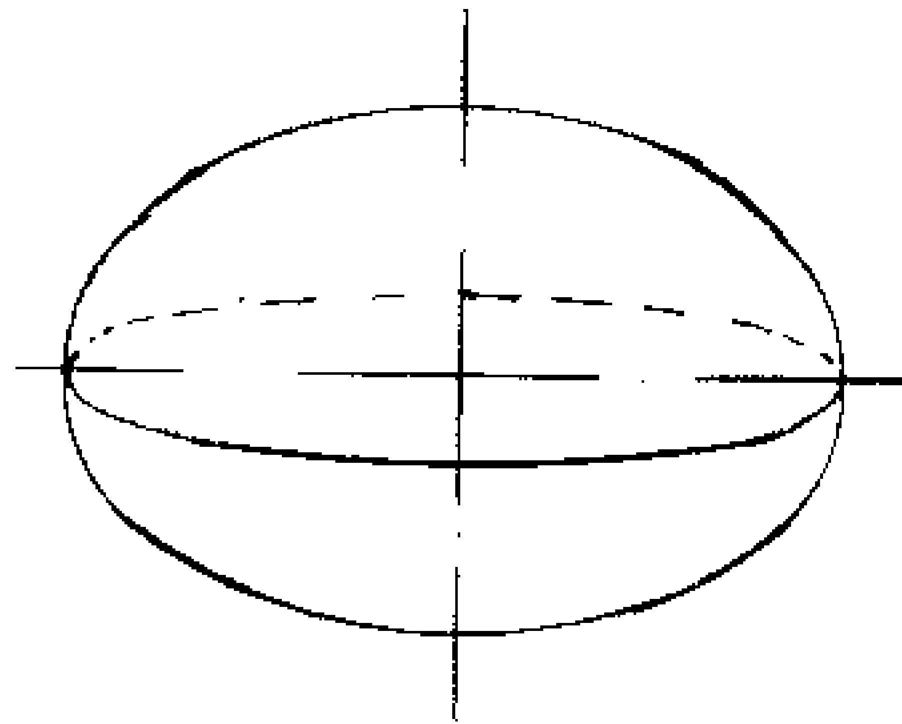
ووجد نيوتن في نظريته الجديدة هذه برهانا لدوران الارض حول محورها قال : لو أجرينا تجربة ميكانيكية على جسم موجود على سطح الارض وحللنا القوى المطبقة عليه اضطررنا لتعليل الظاهرة الميكانيكية الملاحظة الى اضافة قوة ظاهرية هي القوة التي تنشأ في هذا الجسم



شكل ١٨

نتيجة دوران الجملة المقارنة المقيدة بالارض (شكل ١٨) فالقوة التي نسميها نحن وزنا لا تساوي قوة جذب الارض لهذا الجسم الموجود على سطحها بل تفرض القوانين وجوب اضافة قوة الى هذه القوة الجاذبة وتتحول هذه القوة مع وضع الجسم على سطح الارض وتتعلق ببعد الجسم عن محور الدوران وتسمى بالقوة النابذة •

واذا قبلنا بثبات الارض مع دوران الكواكب من حولها أي لـو احتفظنا بالحركة الدائرية النسبية للارض بدلالة القبة السماوية لما نشأت القوة النابذة وبقيت القوانين الميكانيكية مغلوطة تعاني نقصا • وتابع بعدها نيوتن قائلا : « القوة النابذة التي تؤثر على الاجسـام الموضوعة على سطح الارض تؤثر في الوقت ذاته على ذرات الجزئيات الارضية وتعمل على دفعها بعيدا عن محور الدوران ويؤدي ذلـك في النتيجة الى تفلطح الكرة الارضية (شكل ١٩) ولو كانت الارض ثابتة



شكل ١٩

في الفضاء والكواكب تدور من حولها لما حدث هذا التفلطح (تقعر سطح الماء الدائر) • وتدل القياسات التي أجريت على سطح الارض أن هذه الاخيرة ليست كروية وانما مفلطحة • وأتت هذه الظاهرة دعما جديدا لنظرية نيوتن في امكانية تحديد الحركة المطلقة • واعترض عدد

كبير من الفلاسفة والعلماء على هذه الافكار . واستغرب الفيلسوف ماك (Mack) حيود نيوتن عن القواعد الاساسيـة التي وضعها لنفسه : فنيوتن الذي قال بعدم قبول العقل لحقيقة الا متى أيدتها التجارب تراه يعلن أن تفلطح الارض لا يمكن أن يكون نتيجة لدوران القبـة السماوية من حولها ، فهل تمكن نيوتن من التحقق تجريبيا من هـذه الحقيقة حتى يقبلها عقله الجبار المفكر . وهل تكفي تجربة دورق الماء كي ينتقل منها نيوتن الى ظواهر أعم كالظواهر الفلكية ؟ ومن قال له بأن سطح الماء لا يمكن أن يتقعر بنتيجة الحركة النسبية للماء بدلالة الكون بأجمعه ؟

وحاول ماك وضع أسس ميكانيك جديد يعتمد فقط على الحركـة النسبية ويفرض عدم وجود ما أسماه نيوتن بالحركة المطلقة الا أنه فشل في محاولته . ويعلل العالم اينشتين فشل ماك لكونه لم يفهم العلاقة التي بين الكتلة العاطلة والكتلة الثقيلة ولكونه لم يستفد أيضا من فشل تطبيق القوانين الميكانيكية على الظواهر الضوئية والكهرطيسية .

تحويلات غاليله :

لاحظ غاليله أن الحجر ، الذي يسقط على الشاطىء سقوطا حرا ، يرى من غرفة السفينة يرسم قطعا مكافئا ، كذلك الحجر . الذي يسقط سقوطا حرا في غرفة السفينة ، يرى من الشاطىء يرسم قطعا مكافئا .

استدل غاليله من هذه الظاهرة على وجود حركة نسبية مستقيمـة منتظمة بين جملة السفينة وجملة الشاطىء .

ووضع نيوتن مجموعة من العلاقات الجبرية بين احداثيات نقطـة معينة مردودة الى الجملتين ، وخلص منها الى حل المسألة التالية :

اذا علمنا وضع وسرعة جسم معين في جملة عطالية (م) يمكننـا تعيين وضع وسرعة الجسم بدلالة جملة عطالية ثانية ($م_١$) وتؤول المسألة

الى الانتقال من جملة مقارنة الى جملة مقارنة ثانية تتحرك بدلالتها حركة مستقيمة منتظمة بسرعة (سر) .

وبالرجوع الى الاحداثيين الممثلتين في الشكل (١٦) من الفقرة السابقة نحصل على العلاقات التالية :

$$س_١ = س - سر ز \ (١) \ ، \ ع_١ = ع \ (٢) \ ، \ ص_١ = ص \ (٣)$$

ونضيف الى هذه المعادلات الثلاثة معادلة رابعة تعبر عن فكرة الزمن المطلق :

$$ز_١ = ز \ (٤)$$

وتعرف العلاقات الاربعة أعلاه بتحويلات غاليله .

فاذا نظرنا ، الظاهرة ميكانيكية تحدث في الجملة ($م_١$) ، من الجملة (م) وحصلنا على قانون هذه الظاهرة ثم أجرينا على القانون الناتج تحويلات غاليله أخذ عندها هذا القانون الشكل الذي كان ليأخذه فيما لو تمت الظاهرة في الجملة (م) .

ونعبر عن ذلك بالصيغة التالية :

تمثل الظواهر الميكانيكية ، التي تحدث في جمل عطالية مختلفة ، في احدى هذه الجمل بقوانين متماثلة شرط أن تطبق عليها تحويلات غاليله .

علاقة تركيب السرع :

اذا تحرك جسم بدلالة الجملة ($م_١$) حركة مستقيمة منتظمة موازية للمحور ($س_١$) وكانت سرعته في هذه الجملة هي $سر_١$. واذا تحركت

الجملة (م١) بدلالة الجملة (م) بحركة مستقيمة منتظمة موازية للمحور (س) وكانت سرعتها بدلالة الجملة (م) هي سرَ ، ركبت السرعتان واعطيت سرعة حركة الجسم بدلالة (م) بالعلاقة :

$$\text{سر} = \text{سر}_1 + \text{سرَ}$$

وتعرف العلاقة أعلاه بعلاقة تركيب السرع في الميكانيك الكلاسيكي .

التواقت وثبات الاطوال في الميكانيك الكلاسيكي :

تنص العلاقة (٤) في تحويلات غاليله على تساوي الفترات الزمنية المقدرة في كافة الجمل المقارنة ويعني ذلك أن الحادثتين المتواقتتين في الجملة (م) تكونان متواقتتان أيضا في الجملة (م١) . ولا يهتم الميكانيك الكلاسيكي بكيفية التحقق التجريبي من هذه الظاهرة ويقول العالم اينشتين أن فكرة التواقت هذه لا تكون صحيحة الا متى وضعت التعاريف اللازمة لتحقيقها التجريبي . ويعتقد من جهته أن الميكانيك الكلاسيكي توصل الى مفهوم التواقت بعد تبنيه امكانية انتشار التأثير لحظيا وعن بعد . فاذا ما وقعت حادثة في نقطة من الكون انتشر هذا التأثير لحظيا الى كافة بقع هذا الكون وشعر الجميع بوقوعه في لحظة واحدة اينما كانوا ومهما كانت حركة الجملة التي تحملهم . واذا وقعت حادثة ثانية في ذات النقطة التي وقعت فيها الحادثة الاولى انتشر تأثيرها أيضا لحظيا الى كافة النقط .

وفي هذه الحالة فقط تبقى الفترة الزمنية الفاصلة بين حادثتين وقعتا في جملة معينة مساوية للفترة الزمنية الفاصلة بين هاتين الحادثتين المنظور اليهما من جملة مقارنة أخرى .

والشكل الهندسي لجسم معين يمثل الاوضاع اللحظية (instantanés) لمختلف نقاطه . فاذا وضعنا شكلاما في الجملة المقارنة (س ع ص)

احتلت نقط هذا الشكل أوضاعها في لحظة واحدة في هذه الجملة ؛ فهي اذا ظواهر لحظية تقع في الفضاء ولا تختلف لحظة وقوعها من جملة عطالية الى جملة عطالية أخرى .

وتكفي ساعة واحدة لتقدير الزمن في مختلف الجمل المقارنة مهما كانت حركتها واذا نقلت هذه الساعة من جملة مقارنة الى جملة مقارنة أخرى لم يطرأ أي تبديل على سيرها وبقيت الفواصل الزمنية محافظة على قيمتها المطلقة .

فاذا وضعنا في لحظة معينة مستقيما قدر طوله بـ (ل) في الجملة المقارنة (م) ونظرنا الى هذا المستقيم من الجملة ($م_{١}$) لوجدنا أن الطول المحسوب بدلالة هذه الجملة يساوي تماما الطول المحسوب في الجملة الاولى . ويمكن التحقق من هذه الظاهرة بواسطة تحويلات غاليله* .

ويعني ما تقدم أن الاطوال بالاضافة الى الازمنة والكتل هي كلها مقادير ثابتة لا تتأثر بحركة الجملة المقارنة .

---

* نفرض (س ، ع ، ص) و (س′ ، ع′ ، ص′) احداثيات طرفي المستقيم المردود للجملة (م) و ($س_{١}$ ، $ع_{١}$ ، $ص_{١}$) ($س'_{١}$ ، $ع'_{١}$ ، $ص'_{١}$) احداثيات طرفي المستقيم المردود للجملة ($م_{١}$)
$ل^{٢} = (س' - س)^{٢} + (ع' - ع)^{٢} + (ص' - ص)^{٢}$ و $ل_{١}^{٢} = (س'_{١} - س_{١})^{٢} + (ع'_{١} - ع_{١})^{٢} + (ص'_{١} - ص_{١})^{٢}$.

ومن تحويلات غاليله لدينا : $س = س_{١} + سرز$ ، $ع = ع_{١}$ ، $ص = ص_{١}$
$س' = س'_{١} + سرز$ ، $ع' = ع'_{١}$ ، $ص' = ص'_{١}$
وباستبدال كل حد بقيمته نحصل على العلاقة $ل = ل_{١}$

الفصل الخامس

المبادئ الاساسية في علم الضوء

علم الميكانيك هو المدخل الاساسي لكافة العلوم الفيزيائية . وفي الفصول السابقة ذكرنا العديد من النظريات والتطبيقات الميكانيكية التي قادتنا في النهاية الى شرح فكرتي المكان والزمان .

والميكانيك وان كان أساسا للعلوم الفيزيائية الا أنه لا يشكل الا جزءا يسيرا من هذه العلوم . وواجبنا سبر غور العلوم الاخرى علنا نجد فيها ما يساعدنا في توضيح فكرتي المكان والزمان .

تتصل أبحاث الضوء والكهرباء اتصالا وثيقا بفكرتي المكان والزمان لان كلا من الضوء والكهرباء يخترق الامكنة المخلاة من المادة تخلية تامة . وتصلنا الاشعة الضوئية المنبعثة من الشمس والكواكب عبر خلاء الفضاء الكوني وتنتقل القوى الكهرطيسية عبر هذا الفضاء .

وتنبه الاقدمون الى هـذه الظاهرة . وحاولوا تعليل انتشارهـا فاعتبروا الفضاء مملوءا بما دعوه بالاثير (Ether) وخص هذا الوسط بصفات فيزيائية خاصة .

ونورد في الفصول التالية بعض مبادىء ونظريات على الضـوء والكهرباء لنصل منها الى تعريف محدد للوسط الاثيري وقد تمكننا هذه الدراسة من العودة من جديد الى فكرتي المكان والزمان لنعطيهما مفهوما جديدا يوصلنا بالنتيجة الى تفهم نظريات اينشتين .

وقبل استعراض المبادىء الاساسية لعلم الضوء لا بد لفهم آلية هذا العلم من شرح مقتضب للحركات الاهتزازية .

الحركات الاهتزازية :

اذا ألقينا حجرا صغيرا في ماء بركة راكدة ، شاهدنا حدوث تموجات دائرية تنتشر فوق سطح الماء • يقع المركز المشترك لهذه الدوائر في مكان القاء الحجر • واذا وجد على سطح الماء قطع من الفلين رأيناها تقـوم بحركة هبوط وصعود متناوبة ، دون أن تبارح مكانها رغم انتشـار الموجات الدائرية ، لتصل الى أمكنـة بعيـدة نسبيا فوق سطح الماء • فتسمى الحركة المنتشرة على السطح بالحركة الموجية كما تدعى حركة قطعة الفلين بالحركة الاهتزازية • وتهتز قطعة الفلين في مستوى عمودي على جهة انتشار الحركة الموجية وتسمى حركتها بالحركة الاهتزازيـة العرضانية •

وفي بعض الحالات يمكن للحركة الاهتزازية أن تتم في مستوى يوازي جهة انتشار الحركة الموجبة فتسمى عندها بالحركة الاهتزازية الطولانية •

وتتميز الحركة الاهتزازية بدورها وهو زمن الاهتزازة الكاملة ، وبسعتها وهي أبعد نقطة تصل اليها النقطة المهتزة عن مركز الاهتزاز • يرمز للدور بـ (د) ويعرف تواتر الحركة الاهتزازية بعدد الاهتزازات الكاملة في كل ثانية ويرمز له بـ (تو) :

$$\text{تو} = \frac{1}{\text{د}}$$

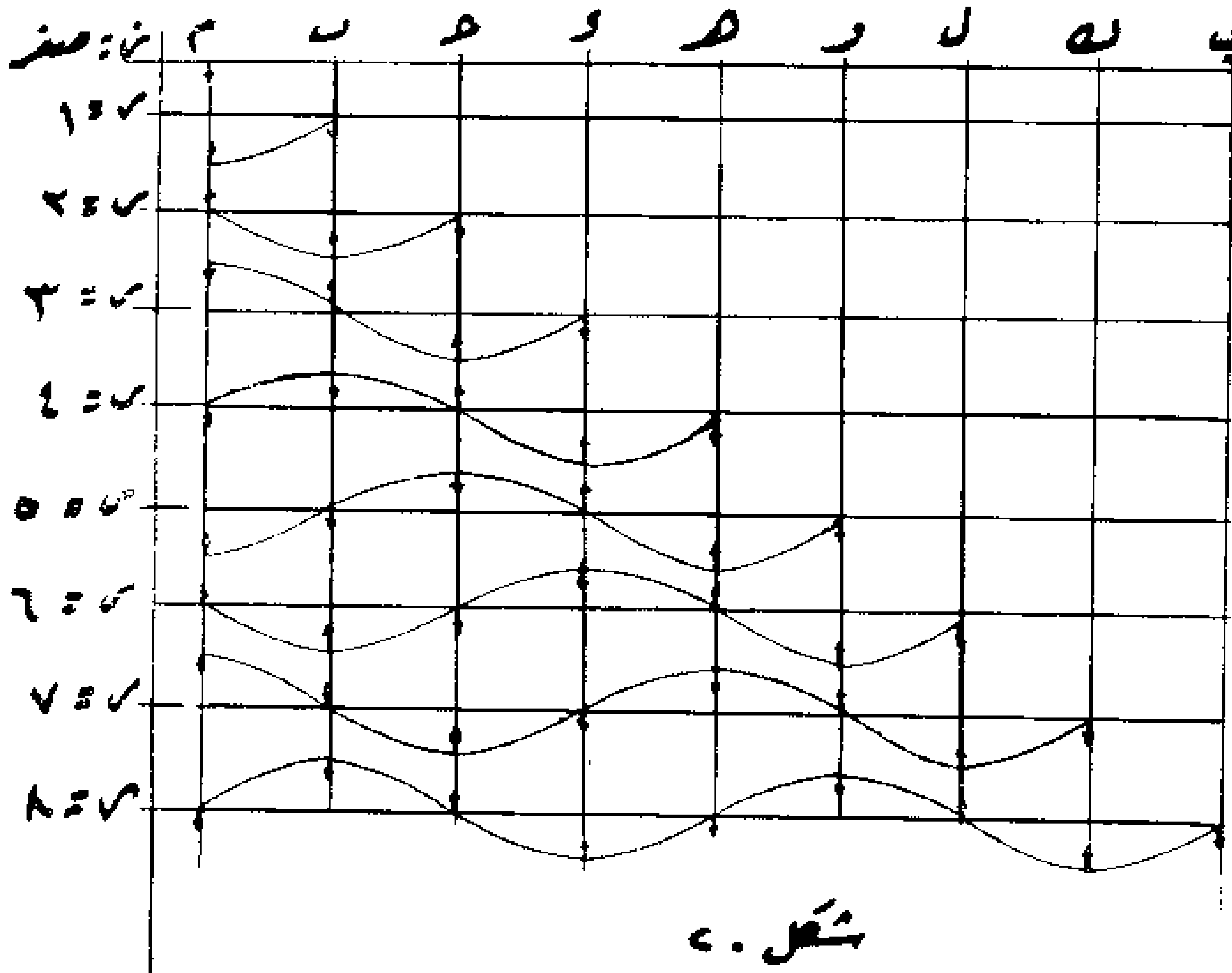
ولا تنتشر الحركة الموجية لحظيا الى مسافات بعيدة وانما تقطـع مسافات محدودة في أزمنة محدودة • وتكون حركة الانتشار منتظمة في الاوساط المادية المتجانسة ويرمز لسرعتها بـ (ث) تمييزا لها عن سرعة الاهتزاز التي يرمز لها عادة بالرمز (سر). وسرعة الاهتزاز ليست ثابتة بل تمر بقيم معدومة وقيم عظمى •

وتتميز الموجة بطولها ويرمز له بـ (ط) و :

ط = ث × د

أي أن طول الموجة يساوي جداء سرعة انتشارها بدور اهتزازها • فالامواج العالية التواتر (صغيرة الدور) تكون قصـيرة • والامواج المنخفضة التواتر تكون طويلة • وطول الموجة هو المسافة الفاصلة بين نقطتين من الوسط هما في حالة اهتزازية واحدة •

ويمثل (الشكل ٢٠) مقطعا عرضيا للحركة الموجية المنتشرة على سطح الماء الراكد • ولا تنتشر الموجة الا في وسط مرن ويعزى انتشارها الى القوى المتبادلة بين جزئيات هذا الوسط • وتبقى سرعة الانتشار



شكل ٢٠

(ث) ثابتة في وسط مرن متجانس وتتناسب هذه السرعة مع عامل مرونة هذا الوسط •

وبين العلماء أن الصوت هو عبارة عن حركة اهتزازية طولانية تنتشر في الاوساط المادية • وتكون سرعة انتشار الموجة الصوتية في الهواء وفي شروط فيزيائية معينة مساوية ٣٤٠ م/ثا • وتكون سرعة انتشار الصوت في الاجسام الصلبة أكبر من سرعته في الاوساط السائلة كما أن السرعة في الاوساط السائلة تكون أكبر من السرعة في الاوساط الغازية • ولا تنتشر الموجة الصوتية في الخلاء لعدم وجود وسط مادي مرن يعمل على نقلها • ودلت المناقشات الرياضية على امكانية انتشار أكثر من موجة واحدة في وسط مادي معين وبينت الحسابات كيفية تركيب الحركات الاهتزازية المنتشرة في الوسط المادي • وتجمع الحركات جمعا جبريا عندما تكون كلها عرضانية أو كلها طولانية . وفي غيرها من الحالات تجمع الحركات جمعا هندسيا •

وأبسط حالات الجمع هو جمع حركتين اهتزازيتين متماثلتين دورا ونوعا ونحصل عندها على ما يعرف بظاهرة التداخل • ولا يتيح لنا اطار هذا الكتاب شرحا أوسع لظاهرة التداخل ونكتفي بأن نقول : انه يمكن ، بنتيجة تداخل موجتين ، الحصول على نقط تنعدم فيها الحركة الاهتزازية ، ونقط أخرى تكون سعة الاهتزاز فيها عظمى •

النظريات الاساسية في علم الضوء :

أثبت العالم اينشتين ببراهين رياضية قاطعة في نظريته النسبية العامة ، كون الاشعاعات الضوئية لا تنتشر على خطوط مستقيمة بل تنحني عند مرورها بجوار مجال جاذب ، وتتبع هذه الاشعاعات قوانين التحريك التي وضعها خصيصا • ويتطلب ، تعيين المسارات المنحنية للاشعاعات

الضوئية ، اجراء قياسات دقيقة جدا لا يصل اليها الا من زود بأجهزة فائقة الحساسية .

والانسان بطبيعته يميل الى الاشكال البسيطة التي لا تخرج عن نطاق المنطق والتقاليد . لذلك رأيناه منذ الحضارات الاولى يـأخذ بفكرة الانتشار المستقيم للاشعاعات الضوئية ، أضف الى ذلك ، كان الضوء بنظر هؤلاء ينتشر لحظيا الى كافة بقع الكون .

وفي عام ١٦٧٥ برهن العالم الدنمركي رومر (Roemer) أن سرعـة انتشار الضوء هي سرعة محدودة .

وكان قد سبق العالم والفيلسوف ديكارت (Descartes) أن أكد أن سرعة انتشار الضوء هي سرعة غير محدودة . وقـد عارضه في نظريته هذه العالم غاليله وأخذ بفكرة السرعة المحدودة ، وكان غاليله كما ذكرنا عالم مجرب لا يقر الحقيقة العلمية الا متى أخضعها للتجربة .

لذلك رأيناه يصطحب في احدى الليالي زميلا له مزودين بمصباحين قويين ووقف الاثنان على مسافة ما يقرب من خمس كيلو مترات وقاما بالتجربة التالية : يضيء غاليله مصباحه وعندما يشاهد زميله الاشـارة الضوئية يضيء بدوره مصباحه ، ويرى غاليله الاشارة ويقيس الزمن المنقضي بين اضاءته مصباحه ورؤيته اشارة مصباح رفيقه ، ويقسـم ضعف المسافة الفاصلة بين المصباحين أي عشرة كيلومترات على الفترة الزمنية المقاسة ، فيحصل بذلك على قيمة سرعة انتشار الضوء . وأعاد التجربة عددا من المرات وحصل على نتائج متباينة للغاية ولم يتمكن بالتالي من ايجاد قيمة صحيحة لسرعة انتشار الضوء .

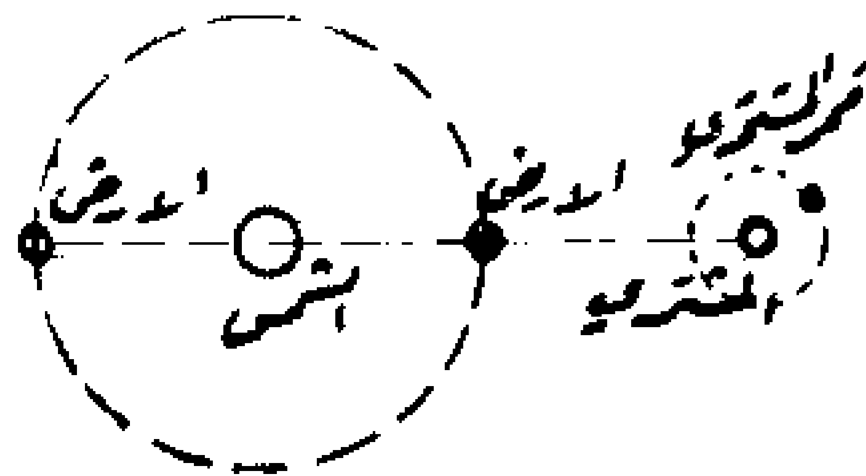
ويعلل اليوم فشل تجارب غاليله بسهولة : فقد كانت سرعة الضوء كما قيست بعد غاليله مساوية ٣٠٠٠٠٠ كم/ثا . وعليه ينبغي أن يكون

الزمـن المقدر في السـاعة المائية التي استعملهـا غاليله مساويـا $\frac{١٠}{٣٠٠٠٠٠٠} = \frac{١}{٣٠٠٠٠٠}$ ثانية وهو كما نرى زمن صغير جدالا يمكن قياسه بواسطة الساعة المائية وهو أصغر بكثير من الزمن اللازم لردود الفعل العصبية كي تنقل احساسات العين الى الدماغ ومنه الى اليد .

وانحاز غاليله على مضض الى أنصـار الانتشار اللحظي للضوء وانصـرف الى مشاهداته الفلكيـة ، فاكتشف المشتري (Jupiter) وأقماره الاربعة ولاحظ الخسوف الدوري ، لهذه الاقمار في دورانها حول المشتري .

وكان اكتشافه هذا الباعث الاساسي للعالم الفلكي رومر في تحديد سرعة انتشار الضوء .

لاحظ رومر عام ١٦٧٥ أن ظاهرة خسوف أقمار المشتري المشاهدة لا توافق تماما الجداول المنظمة لها . وقد وجد أن الفترة الزمنية بـين خسوفين متتالين لاحد هذه الاقمار تزداد تدريجيا عندما تنتقل الارض على مدارها حول الشمس من وضع تكون فيه هذه الارض واقعة بين الشمس والمشتري الى الاوضاع الاخرى التي تصبح فيها الشمس بين الارض والمشتري (شكل ٢١) وتبلغ هذه الزيادة مقدار ١٠٠٠ ثانيـة عندما تصبح الارض في نهاية القطر المار بالشمس والمشتري . وعلل



شكل ٢١

رومر هذه الزيادة بأنها تساوي الزمن اللازم للاشعاعات الضوئية الواردة من قمر المشتري حتى تقطع المسافة الاضافية المساوية لقطر المدار الارضي وحسب قيمة هذه السرعة فوجدها تساوي ٢٩٠٠٠٠ كم/ثا • وتمكن العالم فيزو (Fizeau) عام ١٨٤٩ من قياس سرعة الضوء بدقة فائقة ، وامتازت تجربته بأنها أجريت على مسافات صغيرة وعلى سطح الارض ، وحصل على قيمة للسرعة تساوي ٣٠٠٠٠٠ كم/ثا •

بعد أن برهن رومر أن الاشعاعات الضوئية لا تنتشر لحظيا في الفضاء وأعطى قيمة لسرعتها المحدودة ، اتجهت أبحاث العلماء الى الضوء وبدأ البحث الجدي في طبيعته وتواردت النظريات المختلفة المتعلقة ببنيته وانقسم العلماء الى فريقين فريق انحاز الى جانب نيوتن ومدرسته وفريق آخر انحاز الى جانب هويجنز (Huygens) ودام الصراع العلمي بين الفريقين ما ينوف على نصف القرن •

ونظرا لاهمية كل من الرأيين في تعليل البنية الضوئية . سوف نورد فيما يتبع شرحا مختصرا لكل منهما بقدر ما يسمح لنا اطار هذا الكتاب •

اهتم العلماء الاقدمون بالظواهر الضوئية ، وحاول بعضهم وضع نظريات خاصة بطبيعة الضوء فتطرق الشاعر والفيلسوف الاغريقي لوكريس (Lucrèce) في القرن الاخير قبل الميلاد الى بنية الضوء وقال : « تصدر عن سطوح الاجسام أشكال متفككة تقطع في لحظة مسافات هائلة ، وأينما وجهنا أنظارنا تتلقف أعيننا هذه الاشكال التي تؤثر في حاسة النظر فتجعلنا نراها » •

واهتم العرب بعلم الضوء وحلق العالم العربي « ابن الهيثم » في أجواء هذا العلم ووضع القوانين الاساسية للانعكاس والانكسار الضوئي • وقد اطلعت شخصيا على بعض مخطوطاته الاصلية المحفوظة

في مكتبة الاسكوريال (Escorial) قرب مدريد ، وقد ضمنها ابن الهيثم القوانين الاساسية للانعكاس والانكسار التي تعرف اليوم خطأ باسم قوانين ديكارت . ويؤلمني أن أقول أنه لو كان ابن الهيثم من أبناء أمة أوربية لرأيتم كيف يكون التقدير وكيف يذاع اسمه وتنتشر سيرته ولما تجرأ مؤلفو الغرب على اعتبار العالم الفرنسي ديكارت أول واضع لاصول هذا العلم .

لقد نشر ديكارت كتابه « البصريات » عام ١٦٣٨ بينما كتب عالمنا مخطوطته « المناظر » في القرن الحادي عشر بعد الميلاد . وكان هذا الكتاب أكثر الكتب القديمة استيفاءا لابحاث الضوء وأرفعها قدرا . حتى لامكن اعتبار « ابن الهيثم » رائد علم الضوء كما يعتبر نيوتن رائد علم الميكانيك . ويمكن القول : ان « ابن الهيثم » قد طبع علم الضوء بطابع جديد أوجده هو فقد بدأ البحث من جديد وأعاد أبحاث الذين سبقوه لا لاستقصاء البحث فحسب بل لقلب الاوضاع أيضا .

واذا تطرقت هنا لذكر العالم ديكارت فلن أذكره بوصفه واضع قوانين خاصة بالانعكاس والانكسار ، وانما لانه كان أول من بحث في العصر الجديد عن طبيعة الضوء وعن طبيعة الوسط الذي ينتشر فيه ، اذ اعتبر الظواهر الضوئية بمثابة حركات اهتزازية تنتشر في وسط يملأ فراغ الفضاء الكوني وأطلق على هـذا الوسط اسم الاثير

وعندما عرض العالم هويجنز نظريته الموجية في الضوء عام ١٦٧٨ اعتمد فيها على أفكار ديكارت الا أنه تميز عن سلفه في كونه صاغها بلغة رياضية واضحة . وكان قد سبق للعالم نيوتن منذ عام ١٦٦٦ أن وجه اهتمامه الى بحث الصوت فوجد أن الصوت هو عبارة عن حركة موجية طولانية تنتشر في الهواء من قريب الى أقرب دون أن تندفع معها الذرات الهوائية وأوضح بتجارب مدهشة ظواهر الانعكاس والانكسار في الصوت وظاهرة تداخل الامواج الصوتية .

وعندما ترامى الى مسامعه ما سجله العالم رومر من تحديد لسرعة الضوء ، ترك الصوت جانبا وانصرف الى علم الضوء محاولا دراسة البنية الضوئية وأعلن بعدها ما عرف بالنظرية الجزيئية للضوء وتسمى أيضا بنظرية الاصدار .

تأثر نيوتن الى حد بعيد بنظرة ، الفيلسوف لوكريس ، للبنية الضوئية وكانت نظريته في الاصدار ترجمة شبه حرفية لما سبق أن نادى به لوكريس فيقول نيوتن : « تنثر سطوح الاجسام المضيئة في الفضاء ، جزئيات صغيرة للغاية تنتشر في الفضاء في كافة الاتجاهات بسرعة فائقة وتتبع في حركتها القوانين الاساسية في التحريك . وتصطدم هذه الجزئيات بالعين فتجعلها تتعرف على شكل الجسم ولونه » .

وبالاستناد الى نظرية الاصدار استطاع نيوتن تعليل ظاهرة الانعكاس الضوئي بسهولة فائقة ولكنه وجد صعوبة مبدئية في سبيل تعليل ظاهرة الانكسار ، وأعاد هذه الظاهرة الى نوع من التجاذب بين الذرات الضوئية المادية وذرات الوسط الكاسر ، وخلص من ذلك الى نتيجة تعتبر اليوم مغلوطة وهي أن سرعة انتشار الضوء في الاوساط الكاسرة ينبغي أن تكون أكبر منها في الخلاء .

واكتشف نيوتن الحلقات الملونة المعروفة باسمه وحاول تعليلها بالاعتماد على نظرية الاصدار ولكنه لم يوفق الى برهان حدوث الظلام الدامس في مكان تصدمه الجزئيات الضوئية من كل جانب .

وفي هذه الآونة تنبه العالم هويجنز الى ضعف نظرية الاصدار وفشلها الذريع في تعليل ظاهرة التداخل وأعجب بنظرة ديكارت الى الضوء واعتباره اياه حركة موجية تنتشر في الأثير . وبعد تأمل عميق ومناقشات فكرية رياضية أعلن هويجنز نظريته الموجية ووضع لها الاصول الرياضية . ومكنته النظرية من تعليل ظواهر الانعكاس والانكسار

والتداخل بسهولة فائقة كما تبين له أن سرعة الضوء في الاوساط الكاسرة ينبغي أن تكون أصغر من سرعته في الخلاء .

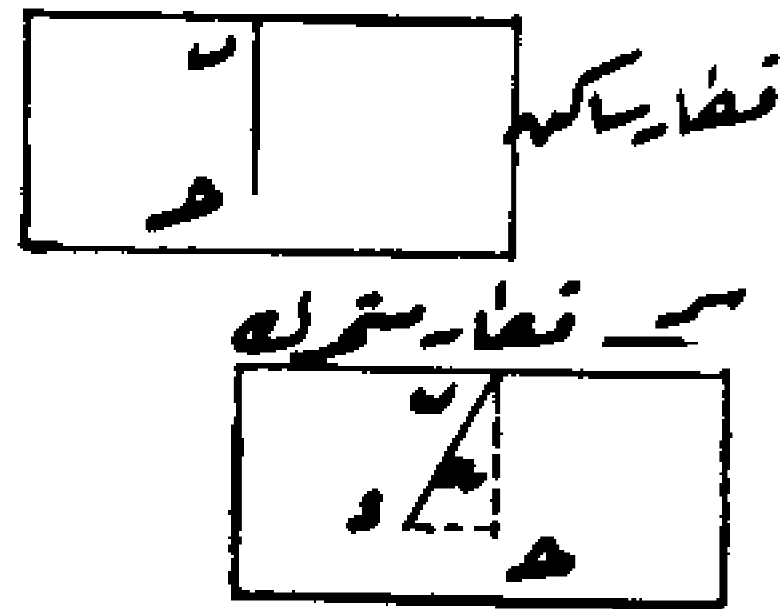
وبالرغم من ذلك ظلت نظرية هويجنز منسية . لقد قاومها نيوتن ومدرسته من بعده بكل ضراوة ، ولم يحرز علم الضوء أي تقدم طيلة القرن الثامن عشر ، ويعود هذا الجمود الى سلطة نيوتن ونفوذه العلمي . وقد وجد نيوتن في النظرية الموجية نقطة ضعف واحدة وهي أن هويجنز جارى الفيلسوف ديكارت في اقتراحه ملء الفضاء الكوني بالوسط الاثيري وزاد على سلفه في أنه افترض هذا الوسط المرن يغمر كافة الاجسام المادية الشفافة ويصل حتى الى فراغاتها الذرية . فكان هذا الفرض مناقضا لابسط بديهيات العلم اذ كان الوسط المقترح خياليا لا يقره المنطق ولا يطاله التجريب . واعتقد نيوتن أن هويجنز لم يدخل الأثير الا ليعلل معه ظاهرة التداخل .

وظل نيوتن وتلامذته من بعده متمسكين بالبنية المادية للضوء وسيطرت مبادؤهم الكلاسيكية على هذا العلم أيضا طيلة القرنين الثامن عشر والتاسع عشر ولم تسمح بأي انتقاد أو تجديد ، وقيدت الجزئيات المادية الضوئية بقوانين التحريك الكلاسيكية .

واكتشف العالم الفلكي جيمس برادلي (James Bradley) عام ١٧٢٨ ظاهرة الحيود (aberration) الضوئي . ونجح الميكانيك الكلاسيكي في تعليل الظاهرة الجديدة بينما فشلت النظرية الموجية في تعليلها . وكان لحادثة الحيود هذه دور رئيسي في فتح باب المناقشة العلمية على مصراعيه وتهيئة العقول لتقبل آراء وأفكار اينشتين وفيما يلي شرح لهذه الظاهرة .

تتخيل أنفسنا جالسين في عربة قطار ساكن في المحطة ولنفرض أن

المطر ينهمر شاقوليا على نافذتنا من الخارج • ترسم عندها قطرات المطر خطوطا شاقولية على زجاج النافذة (شكل ٢٢) •



شكل ٢٢

فاذا سار القطار بسرعة (س) شاهدنا عندها خطوط الماء مائلة على النافذة تصنع مع الشاقول زاويه (ه) • وتساعدنا هذه الزاوية في حساب سرعة القطار اذا علمنا مسبقا سرعة سقوط قطرات المطر ، اذ أنه في الفترة الزمنية التي تسقط فيها القطرة من السوية (ب) الى السوية (حـ) يتحرك القطار من النقطة (حـ) الى النقطة (ء) ويكون :

$$\text{ظل ه} = \frac{\text{س}}{\text{س}_{١}} = \frac{\text{حـ د}}{\text{ب حـ}}$$

وترمز س الى سرعة القطار بينما ترمز $\text{س}_{١}$ الى سرعة قطرات الماء •

ويساعدنا التشبيه أعلاه في فهم ظاهرة الحيود •

لاحظ برادلي أن النجوم « المعتبرة ساكنة » ترسم اذا ما نظر اليها من الارض في عام كامل قطوعا ناقصة يساوي القطر الظاهري لمحورها الكبير ٤١ ثانية . ولا يشذ نجم واحد عن هذه الظاهرة • واستغرب برادلي هذه الحادثة وخلص منها الى أنها تعود الى الحركة الحقيقية

للارض حول الشمس ، تماما كما يعود الخط المائل الذي ترسمه قطرة الماء في تجربة القطار الى حركة القطار بدلالة المحطة •

وعلل برادلي ظاهرة الحيود الضوئي بالاستناد الى مفاهيم الميكانيك الكلاسيكي والى البنية المادية للضوء •

قال : لو كانت الارض ساكنة في مكانها كسكون النجم لوجب أن يوجه محور النظارة الفلكية الناظرة للنجم في جهة الاشعاعات الضوئية الواردة منه ، ولنفرض أن النجم المشاهد يقع على شاقول النقطة الارضية المشاهد منها (شكل ٢٣) فاذا كانت الارض ساكنة يجب أن يكون محور النظارة شاقوليا • وترد الجزئيات الضوئية على النظارة

شكل ٢٣

وتصطدم بجسميتها وتخترق محورها راسمة مسارات موازية له • فاذا بدأت الارض حركتها على مدارها حول الشمس لحظة وصول الجزئيات الضوئية الى جسميتها انتقلت النظارة مع الارض وقطعت مسافة معينة في الفترة الزمنية اللازمة للجزئيات الضوئية لتخترق النظارة من جسميتها الى عينيتها وعندما تصل الجزئيات الضوئية الى عينية النظارة لا يكون محورها موجها نحو النجم بل في اتجاه آخر يصنع مع الاتجاه الاول

زاوية (ﻫ) • ويرى عندها النجم في وضع لا ينطبق على وضعه الحقيقي•
وبمناقشة مماثلة للتي أجرينا لحالة القطار يكون :

$$\text{ظـل ﻫ} = \frac{\text{س}}{\text{ث}}$$

حيث ترمز (س) الى سرعة الارض على مدارها حول الشمس وتساوي هذه السرعة ٣٠ كم/ثا وترمز (ث) الى سرعة الضوء وتساوي ٣٠٠٠٠٠ كم/ثا •

والفارق بين حالة القطار وحالة النجم هو كوننا نعلم أن قطرات المطر تنهمر شاقوليا بينما لا نعلم الوضع الحقيقي للنجم الملاحظ ، لذلك اقترح برادلي تحديد الوضع الظاهري للنجم في لحظة معينة ، ثم تحديده من جديد بعد مرور ستة أشهر (شكل ٢٤) ومن قياس الزاوية بين الوضعين يكون الوضع الحقيقي للنجم في منتصف الخط الواصل بين الوضعين الظاهريين وتكون الزاوية (ﻫ) المحسوبة من العلاقة أعلاه مساوية لنصف الزاوية بين الوضعين الظاهريين •



شكل ٢٤

وقاس برادلي القطر الظاهري فوجده قريبا من ٤٠ ثانية أي ﻫ = ٢٠ ثانية وبالعودة الى الجداول اللغرتمية نجد أن ظل الزاوية ٢٠ ثانية هو قريب جدا من المقدار $\frac{٣٠}{٣٠٠٠٠٠}$ الناتج من تقسيم سرعة الارض على سرعة الضوء •

ووجد تلامذة نيوتن في ظاهرة الحيود دعما آكيدا لنظرية الاصدار وظنوا أنه لا بد من أن يأتي يوم يصبح فيه من الممكن تعليل ظاهرة التداخل بالاستناد الى نظرية الاصدار •

وفي أوائل القرن التاسـع عشر تمت بعض الاكتشافات الضوئية الهامةعلى يدالعلماءمالوس (Malus) واراغو (Arago) ويونغ (Young) نذكر منها ظاهرتي الانعراج والاستقطاب الدوراني للضوء • ولا يسمح لنا اطار هذا الكتاب بشرح الظاهرتين انما نكتفي بالقول بأن نظرية نيوتن فشلت أيضا هذه المرة في تعليل هاتين الظاهرتين ، ولم تطق الاكاديمية الملكية ذرعا بهذا الفشل ورغبت في الخروج من هـذا المأزق فطرحت المعضلة على مسابقة عالمية ووعدت بجوائز ثمينة لمن ينجح في تعليـل ظواهر التداخل والانعراج والاستقطاب بالاستناد الى نظرية الاصدار •

وأتاها الجواب من مهندس فرنسي شاب يدعى فرنل (Fresnel) الذي حاول دون جدوى تطبيق نظرية الاصدار لتعليل هذه الظواهر وانتهى منها الى النتيجة التالية :

« نظرية الاصـدار مغلوطة ولا يمكن تعليـل ظواهر التداخل والانعراج والاستقطاب الا بالاعتماد على النظرية الموجية » •

ونشر فرنل عام ١٨١٩ كتابا ناقش فيه اسس النظرية الموجية وعدل فيها عندما قال : « يحدث الاحساس بالضوء نتيجة تلقي حاسة النظر تموجات عرضانية يبلغ تواترها بضع مليارات في الثانية الواحدة » • ووضع فرنل في نظريته الجديـدة الاسس الرياضية الموضحة لعلاقة الامواج ببعضها البعض وخلص منها الى امكانية تعليل كافة الظواهر الضوئية المعروفة •

ونال فرنل الجائزة وطرحت نظرية الاصدار جانبا ، ولا يعني ذلك أنه بطرحها تم أيضا طرح المفاهيم الميكانيكية بل على العكس حاول فرنل

ولفيف آخر من العلماء تطبيق مبادىء التحريك الكلاسيكي على الامواج الضوئية العرضانية وعلى الافعال المتبادلة بين هذه الامواج والوسط الأثيري المرن الذي ينقلها .

الاثير المرن :

عندما فرغ فرنل من وضع الاسس الرياضية للنظرية الموجية وجد أنه من العبث اضاعة الوقت في محاولة الدراسة التحريكية للامواج قبل دراسة طبيعة الوسط الاثيري الناقل لها .

وانتهى الى أن الوسط الاثيري هو نوع من الاجسام المرنة والصلبة وذلك لكون الاهتزازات العرضانية العالية التواتر لا يمكنها أن تنتقل في وسط الا اذا اتصف هذا الوسط في آن واحد بالقساوة والمرونة . وعندما حاول فرنل التعمق في دراسة الاوساط المرنة وجد أنه لا يجوز الاسترسال في المقارنة بين الوسط الاثيري وهذه الاوساط ، ومن الافضل الاقتصار على التجارب لاستنتاج قوانين انتشار الضوء ؛ ومتى وضعت هذه القوانين يصار بعدها الى تعليلها بالاستناد الى النظرية الموجية .

ودلت النتائج التجريبية الاولى أنه ينبغي للوسط الاثيري أن يكون مستمرا وأن تنتقل فيه الحركة الموجية من قريب الى اقرب بسرعة محدودة تقارب ٣٠٠ ٠٠٠ كم/ثا .

وفي عام ١٨٢٩ وبعد دراسات عميقة للاوساط المرنة توصل العالم كوشي (Cauchy) الى ايجاد القوانين الرياضية لانتشار الحركات الموجية في هذه الاوساط وكانت علاقة سرعة الانتشار التي حصل عليها هي :

$$ث = \sqrt{\frac{م}{ك}}$$

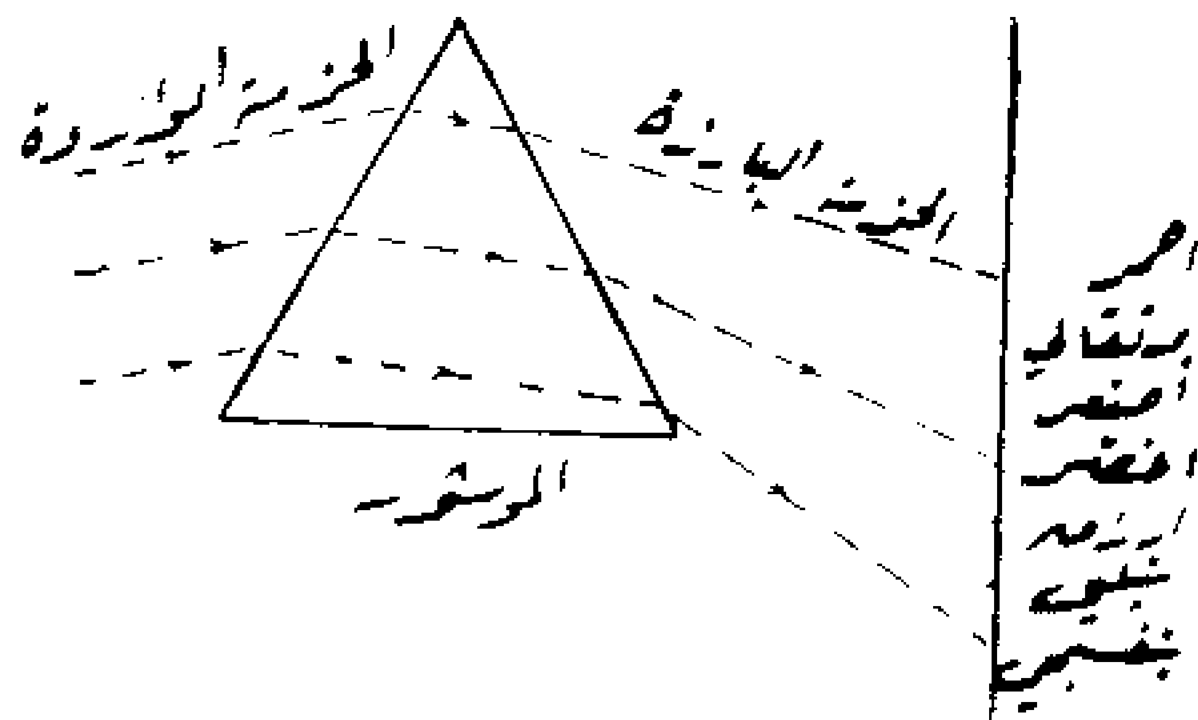
وترمز (ث) لسرعة انتشار الموجة الضوئية في الوسط المرن بينما ترمز (م) لعامل مرونة هذا الوسط وترمز (ك) لكتلته النوعية •

وتبين العلاقة أعلاه أن سرعة الانتشار (ث) تكون كبيرة بقدر ما يكون عامل المرونة كبيرا والكتلة النوعية (ك) صغيرة •

ويملأ الوسط الاثيري الفضاء الكوني ويغمر كافة الاجسام المادية ويدخل الى فراغاتها الذرية وتبقى سرعة الانتشار ثابتة طالما بقيت مرونة وكثافة الوسط الاثيري ثابتتين •

وأراد فرنل تطبيق علاقة كوشي على الظواهر الضوئية الا أنه اصطدم بعقبة كأداء برزت من احدى تجارب نيوتن نفسه •

لقد برهن نيوتن بتجارب مدهشة ان الضوء الابيض المنبعث من الشمس والنجوم هو ضوء مركب يمكن تحليله الى أجزائه بواسطة الموشور (شكل ٢٥) • نسقط الحزمة الضوئية المتوازية الواردة من



شكل ٢٥

الشمس مثلا على موشور من الزجاج الشفاف والكاسر للضوء ، وتتلقى الحزمة الصادرة من الموشور على حاجز أبيض فنشاهد طيفا ضوئيا ملونا

ينتقل مـن الاحمر الى البنفسجي مارا بالبرتقـالي والاصفر والاخضر والازرق • يتميز كل لون بطول موجة خاصة به وطول موجـة اللون الاحمر هو ط = ٨ر• ميكرون (الميكرون هو جزء من الف من المليلمتر) وطول موجة البنفسجي هو ط = ٤ر• ميكرون •

وعلل فرنل ظاهرة تبديد الموشور للضوء باختلاف قرينة انكساره من موجة الى أخرى • وقرينة الانكسار هي خاصة فيزيائية يتصف بهـا السطح الكاسر ، وبيّن فرنل ان قرينة الانكسار تكون دوما اكبر مـن الواحد أي ان السرعة في الخلاء هي السرعة العظمى وتخالف هـذه النتيجة ما كان قد توصل اليه العالم نيوتن بالاستناد الى نظرية الاصدار •

ولا يحدث تبديد الضوء لدى مروره في الفضاء الكوني ، وتتساوى سرعة انتشار الامواج الضوئية على اختلاف ألوانها في هذا الفضاء ويحتم ذلك بقاء مرونة وكثافة الوسط الاثيري الذي يملأ الفضـاء الكوني ثابتتين بنما تختلف سرعة الامواج عند اختراقها الوسط الكاسر ، ويعني هذا اختلاف مرونة وكثافة الوسط الاثيري الذي يملأ الفراغات الذرية للوسط الكاسر الواحد بحسب طول الموجة الضوئية التي تخترقه • ولكن هل يمكن أن تتحول مرونة وكثافة الوسط الواحد لتعطي كـل موجة تخترقه سرعة الانتشار الخاصة بها ؟

كذلك تختلف سرعة انتشار الموجة الواحدة من وسط كاسر الى آخر فهل يمكن أن يتحول تركيز المادة الاثيرية ومرونتها بين مادة وأخرى ؟• وأهم ما وجه من انتقادات ، لفرضية الوسط الاثيري المرن والقاسي هي : تنتقل الاهتزازات الضوئية العالية التواتر في الوسط الاثيري فينبغي لذلك أن يتصف هذا الوسط بمتانة كبيرة ، ومرونة فائقة • ولمـا كان هذا الوسط يملأ كافة أركان الفضاء الكوني وجب لذلك أن تتعرض الكواكب السيارة التي تسبح في الوسط الاثيري لمقاومة شديدة • ولم

يسجل علماء الفلك أي شـذوذ عن قانون نيوتن يعود سببه الى وجود مثل هذه القوى المقاومة •

وتمكن العالم ستوكس . (Stockes) عام ١٨٤٥ من الاجابة على هذا الانتقاد عندما اعتبر مفهوم المتانة في الاجسام الصلبة مفهوما نسبيـا ، يعتمد على القيمة الآنية للقوة المطبقة على الجسم • قـال ستوكس : لو أخذنا مكعبا من الشمع وآخر من الفولاذ ، وأسقطنا سكينا حادا على المكعبين لاحظنا انشطار المكعبين انشطارا مماثلا وهذا يعني أن مكعبي الشمع والفولاذ يتصرفان تصرفا مماثلا بالنسبة لضغط السكين الحاد • ولكن اذا وضعنا كرة صغيرة من البلاتين (من أثقل المعـادن) فوق مكعب الشمع وأخرى مماثلة فوق مكعب الفولاذ ، وجدنا كرة البلاتين تغور ببطء شديد داخل مكعب الشمع ، بينما تبقى ساكنـة فوق مكعب الفولاذ • ويعني ذلك ان الفولاذ يتصرف بالنسبـة لكرة البلاتين وكأنه جسم صلب بينما يتصرف الشمع بالنسبة لهذه الكرةوكأنه جسم مائع لزج •

كذلك يتصرف الوسط الاثيري وكأنه جسم متين عندما تؤثر فيـه القوى الهائلة الناشئة عن التواتر العالي للاهتزازات الضوئية بينمـا يتصرف وكأنه جسم مائع ضعيف اللزوجة الى حد الانعدام عندما تتحرك فيه الاجرام السماوية ببطء شديد (نسبيا) •

النسبية في الضوء :

تطرقنا في الفقرات السابقة الى المبادىء الاساسية في علم الضوء ، ولم نذكر شيئا عن علاقة هذه المبادىء بمفهومي المكان والزمان • بحثنا في سرعة انتشار الضوء وبطبيعته ولم نتطرق لتأثير حركة الاجسـام الباعثة للضوء أو التي تتلقاه أو التي يخترقها هذا الضوء على سرعـة انتشار موجاته •

اعتبر الكلاسيكيون الفضاء الكوني خاليا تماما الا من بعض الجزر المادية الموزعة فيه والمسماة بالاجرام السماوية واختلفت نظرة علماء الضوء المكون عن نظرة علماء الميكانيك له وافترضوه مملوءا بالوسط الاثيري المادي والمرن فكان الكون بنظرهم عبارة عن بحر كبير تسبح فيه الاجسام المادية وينفذ الاثير الى داخل هذه الاجسام مخترقا فراغاتها الذرية • ويكون تركيز المادة الاثيرية ثابتا في الفضاء الكوني ويختلف تركيزها بجوار المادة ، باختلاف هذه المادة وباختلاف الاشعاعة الضوئية التي تنفذ منها •

استعاض الميكانيك الكلاسيكي عن المكان المطلق بالجملة المقارنة المطلقة او بالجملة المقارنة العطالية وعبر قانون النسبيـة في الميكانيك الكلاسيكي على استحالة امكانية تحديد حركة الجملة العطالية بتجارب ميكانيكية تجرى في هذه الجملة •

وظن علماء الضوء انه اذا كان من المستحيل تحديد الحركة الحقيقية للجملة العطالية بتجارب ميكانيكية تجرى داخلها ؛ فلربما أمكن تحديد هذه الحركة بالتجارب الضوئية •

وافترضوا بادىء ذي بدء الوسط الاثيري ساكنا على الاطلاق وكان « المكان المطلق » بنظرهم هو الوسط الاثيري والجملة المطلقة هي جملة فراغية مقيدة بالوسط الاثيري • ويعني ذلك ان الاجسام المادية التي تتحرك داخل « بحر الاثير » لا تشرك الاثير في حركتها فهي بذلك تشبه شبكة الصياد التي تتحرك في البحر دون ان تشرك مياه البحر في حركتها• واستند علماء الضوء في فرضهم هذا على الخاصية التالية : اذا تحركت ذرات الاثير نشأت في بعض أجزائه قوى عطالية تتسبب في تغيير تركيزه، وينتج عن ذلك تحول في سرعة انتشار الموجة الضوئية التي تخترق بقعة الاثير المتحرك ويؤثر تحول السرعة هذا بدوره على المشاهدات الفلكية

ولم يسجل علماء الضوء والفلك ظواهر من هذا القبيل • وحاولوا تعليل الظواهر الضوئية المشاهدة بتطبيق المبادىء التحريكية الكلاسيكية على كل من الامواج الضوئية والوسط الاثيري ، واعادوا هذه القوانين الى الجملة المقارنة المطلقة المقيدة بالاثير الساكن وطرحت عندها المسألةالتالية:

لا تمكننا التجارب الميكانيكية سوى تحديد الحركة النسبيةللاجسام المادية فهل باستطاعة التجارب الضوئية تحديد الحركة الواقعية لهـذه الاجسام بدلالة الاثير الساكن ؟

اذا رغبنا في تحديد حركة سفينة تمخر عباب بحر هادىء نضع يدنا في الماء فاذا شعرنا بتيار الماء يصطدم بيدنا من الشرق الى الغرب ، تأكد لدينا ان السفينة تسير بدلالة الماء من الغرب الى الشرق •

وقد اتبع علماء الضوء طريقة مشابهة في محاولاتهم تحديد حركـة جملتهم بدلالة الجملة الاثيرية ، ولا يعني ذلك أننا في سبيل تحديد حركة الارض بدلالة الاثير نقف على سطحها ونرفع يدنا الى أعلى لنشعر بتيار الاثير انما يتطلب لتحديد تيار الاثير القيـام بتجارب أدق وأوفى ، بتجارب تتناول الموجة الضوئية ذاتها باعتبارها العنصر الكفيل بالتأثر « بتيار الاثير » •

وعلينا اذا أن نعود للموجة الضوئية لندرس تأثرها بحركة الاجسام المادية الباعثة لها او التي تنلقاها او التي تخترقها هذه الموجة •

وتتميز الموجة الضوئية بثلاث صفات :

أ ــ تواتر الاهتزاز •

ب ــ سرعة الانتشار •

جـ ــ اتجاه الانتشار •

فاذا أثرت الحركة الحقيقية للجملة المادية على بعض أو كل الصفات أعلاه كان من الممكن القول بامكانية تحديد الحركة الحقيقية للجملـة بتجارب ضوئية تجرى عليها •

ا ـ تاثير الحركة على تواتر الاهتزاز :

اكتشف العالم دوبلر (Doppler) عام ١٨٤٢ ظاهرة فيزيائية هامة اذ لاحظ تأثير حركة المنبع الضوئي على تواتر اهتزاز الموجة الضوئية التي يصدرها هذا المنبع ٠

ويمكن تسجيل هذه الظاهرة بسهولة في حالة الموجة الصوتية ٠ يتميز الصوت بارتفاعه أي بتواتر اهتزاز موجته ، فاذا كان التواتر عاليا كان الصوت الموافق حادا وتزداد حدة الصوت بازدياد تواتره ٠ فاذا وقف شخص في محطة القطارات بدا له صوت صفارة القطار الداخل للمحطة حادا أكثر منه في حال وقوف القطار ، وكذلك الامر في الحالة التي يغادر فيها القطار مبتعدا عن الشخص يبدو عندها صوته أقل حدة مما هو عليه وهو واقف ٠

ويبدو مما تقدم أن تواتر الموجة الصوتية له علاقة مباشرة بحركة المنبع الصوتي ، غير ان هذه العلاقة تقتصر فقط على الحركة النسبية بين الشخص والقطار فاذا وقف القطار وتحرك الشخص متجها نحوه بدا صوت صفارة القطار اكثر حدة مما هو عليه فيما لو انعدمت الحركة النسبية بين الشخص والقطار ٠

وأطلق على ظاهرة تأثير حركة المنبع على تواتر الموجة الضوئية اسم « ظاهرة دوبلر » ٠

وتواتر الموجة الضوئية يحدد لون هذه الموجة ، فتواتر اللون البنفسجي يساوي ضعف تواتر اللون الاحمر وكل حركة يكون نتيجتها اقتراب الشخص المشاهد من المنبع الضوئي تؤدي الى انتقال طفيف في لون المنبع الضوئي من الاحمر نحو البنفسجي ٠ وينتقل اللون المشاهد انتقالا طفيفا نحو الاحمر فيما لو ابتعد الشخص عن المنبع الضوئي

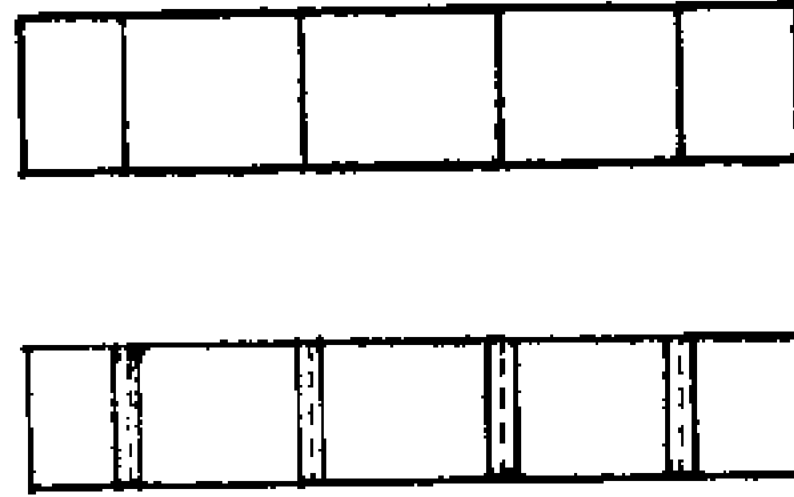
الباعث لهذا اللون ويمكن أن نتحقق تجريبيا من هذه الظاهرة بجهاز ضوئي خاص ، يسمى بالمطياف (Spectroscope) .

ويتألف المطياف من مجموعة من المواشير الشفافة الكاسرة للضوء وتعمل هذه المواشير في تبديد الضوء الساقط عليها تبديدا ملحوظا ، فاذا أسقطنا الحزمة الضوئية البارزة من الموشور الاخير على حاجز ابيض ارتسم عليه طيف ملون يستمر في حالة الضوء الابيض من الاحمر حتى البنفسجي •

ويساعدنا المطياف في تسجيل انتقال اللون حتى ولو كان هـذا الانتقال صغيرا جدا ، ويتم ذلك بالاستناد الى مبدأ طيف الامتصاص فاذا نثرنا في لهب (يصدر ضوءا أبيضا) قليلا من رذاذ ملـح الطعام (كلور الصوديوم) ارتسم على الحاجز الابيض طيف ملـون مستمر تشوبه بعض الخطوط السوداء الرفيعة تسمى هذه الخطوط بخطوط الامتصاص وتظهر الخطوط السوداء في مواقع محددة من الطيف وتحافظ على وضعها حتى لو استبدلنا لهب الشمعة بلهب آخر شرط أن نذر في هذا اللهب الجديد قليلا من كلور الصوديوم •

والخطوط السوداء المذكورة تميز عنصر الصوديوم عن سواه • ولكل عنصر كيميائي خطوط مميزة تحافظ على وضعها في الطيف مهما كان نوع اللهب المستعمل • وتدخل العناصر الكيميائية المؤلفة للقشرة الارضية في تركيب غالبية الاجرام السماوية فاذا وجهنا الاشعة الضوئية الواردة من النجم على مدخل المطياف ارتسم على الحاجز الابيض طيف امتصاص يحوي عددا كبيرا من خطوط الامتصاص ، توافق كل مجموعة منها عنصرا كيميائيا معينا يتحتم وجوده في الابخرة المنتشرة حـول النجم • فاذا قارنا خطوط طيف النجم مع خطوط طيف أرضي ناتـج عن ذر بعض المواد الكيميائية في لهب مفروض وجدنا ان وضع خطوط

طيف النجم لا يطابق تماما وضع خطـوط طيف الارض (شكل ٢٦) أضف الى ذلك نلاحظ بقاء خطوط طيف الارض ثابتة في مكانها في كل



شكل ٢٦

مكان وزمان بينما تتأرجح خطوط طيف النجم الى يمين ويسار وضـع يطابق تماما وضع الخط في طيف الارض ، وتعتبر هذه الظاهرة تحقيقا تجريبيا لظاهرة دوبلر • فالارض تتحرك على مدارها حول الشمس ، وفي الاشهر الستة الاولى من السنة تقترب من نجم ثابت معين ، وفي هذه الفترة يقترب المشاهد الارضي (المطياف) من النجـم ويزداد تواتر الامواج الضوئية النجمية وتنتقل الخطوط الطيفية انتقالا طفيفا نحـو البنفسجي • أما في الاشهر الستة الثانية من السنة تبتعد الارض عـن النجم الثابت ويبتعد المشاهد الارضي عن النجم ويتناقص تواتر الامواج الضوئية وتنتقل الخطوط الطيفية انتقالا طفيفا ، فهي تتأرجح في كل عام الى يسار ويمين وضع معين ثابت •

ويساعدنا المطياف في تحديد الحركة النسبية بين الارض والنجم • غير ان الغاية الاساسية لعلماء الضوء هي في تحديد الحركة الحقيقيـة بدلالة الاثير ، والمطياف اعلاه لا ينبئنا عن الجرم المتحرك فهو يعطي نتائج مماثلة فيما لو تحرك النجم وبقيت الارض ثابتة •

وأجرى علماء الضوء بعض الدراسات الكمية لظاهرة دوبلر وطبقوا

على الامواج الضوئية المنبعثة من المنابع المتحركة تحويلات غاليلـه وحصلوا على النتائج التالية :

١ ـ اذا تحركت الجملة المقيدة بالمجرب بسرعة ثابتة (سر) مبتعدة عن الجملة الحاوية على المنبع الضوئي الثابت بدلالـة الاثير ، وطبقت تحويلات غاليله على الجملتين الاحداثيتين تنج :

$$ن َ = ن (١ - \frac{سر}{ث})$$

ترمز (نَ) للتواتر المشاهد و (ن) للتواتر الحقيقي و (ث) لسرعة الضوء في الوسط وتستبدل النسبة $\frac{سر}{ث}$ بالحرف (هـ) ويكون(هـ< ١).

وفي هذه الحالة تكتب العلاقة أعلاه على الشكل :

$$نَ = ن (١ ـ هـ) \quad (١)$$

وتدل العلاقة (١) ان التواتر المشاهد (نَ) يكون أصغر من التواتر الحقيقي (ن) بنسبة (١ ـ هـ) الى (١) .

٢ ـ اذا اقترب المنبع الضوئي من الشخص الثابت بدلالة الاثير ، بسرعة سر وطبقت علاقات التحويل الكلاسيكية على الجملتين الاحداثيتين تنج :

$$نَ = \frac{ن}{١ ـ هـ} \quad (٢)$$

و (نَ) هـو التواتر المشاهـد و (ن) هو التواتر الحقيقـي و هـ = $\frac{سر}{ث}$

وتدل العلاقة (٢) أن التواتر المشاهد يكون أعلى من التواتر الحقيقي بنسبة (١) الى (١ ـ هـ) .

٣ ـ اذا ابتعد المنبع الضوئي عن الشخص الثابت بدلالة الاثير ،

بسرعة سر وطبقت علاقات التحويل الكلاسيكية على الجملتين الاحداثيتين تنتج :

$$\text{ن}' = \frac{\text{ن}}{\text{١ + هـ}} \quad (٣)$$

وتدل العلاقة (٣) ان التواتر المشاهد يكون أصغر من التواتر الحقيقي بنسبة (١) الى (١ + هـ) •

والحركة النسبية (١) مماثلة للحركة النسبية (٣) ففي الحركة (١) يبتعد الشخص عن المنبع بينما في الحركة (٣) يبتعد المنبع عن الشخص •

ولا تكافىء المعادلة (١) المعادلة (٣) لان المقدار (١ ــ هـ) لا يساوي المقدار $\frac{\text{١}}{\text{١ + هـ}}$

ويمكن اعتبار المقدارين متساويين اذا أهملنا المقدار هـ٢ أمام الواحد* • هـ = $\frac{\text{سر}}{\text{ث}}$ وفي الحركات الطبيعية لا تزيد قيمة سر عن عشرات الكيلومترات في الثانية الواحدة بينما تبلغ (ث) قيمة ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية الواحدة وفي هذه الحالة تكون قيمة هـ من قبيل ١٠^-٤^ وهـ٢ من قبيل ١٠^-٨^

ويمكن اهمال المقدار ١٠^-٨^ أمام الواحد لان مقدارا كهذا لا يتسنى قياسه بأدق الاجهزة التي كانت معروفة آنذاك •

وفي الوقت الذي سوف نمتلك فيه أجهزة ضوئية حساسة تقدر

---

* اذا وضعنا $\frac{\text{١}}{\text{١ + هـ}}$ = ١ ــ هـ لكان ١ = ١ ــ هـ٢ ولا يتم هذا الا متى اهملنا هـ٢ امام الواحد .

المقادير الصغيرة من رتبة $١٠^{-٨}$ يمكننا عندها بواسطة هذه الاجهزة تمييز الحركة الحقيقية من الحركة النسبية . وتساعد ظاهرة دوبلر في تحديد الحركة الحقيقية للجملة بدلالة الاثير الساكن اذا كانت أجهزة التجريب الضوئية دقيقة وقادرة على تسجيل المقادير الصغيرة من رتبة $(\text{هـ})^{٢}$.

وتطرق علماء الضوء في المرحلة الاخيرة من مناقشاتهم الى الحالة العامة : حالة حركة كل من المنبع والمشاهد . فاذا تحرك المنبع بدلالة الاثير بسرعة $\text{سر}_{١}$ وتحرك الشخص بدلالة الاثير بسرعة $\text{سر}_{٢}$ وطبقنا تحويلات غاليله على جملتي المنبع والشخص حصلنا على العلاقة :

$$\text{ن}' = \text{ن} \frac{١ - \frac{\text{سر}_{١}}{\text{ث}}}{١ - \frac{\text{سر}_{٢}}{\text{ث}}} \qquad (٤)$$

فاذا كانت $\text{سر}_{١} = \text{سر}_{٢}$ نتج $\text{ن}' = \text{ن}$ ولا تحصل ظاهرة دوبلر في هذه الحالة .. ويعني ما تقدم : اذا وجد المشاهد والمنبع في جملة واحدة (الارض مثلا) وتحركت هذه الجملة بدلالة الاثير ، فلا يمكن في مثل هذه الحالة حدوث ظاهرة دوبلر .

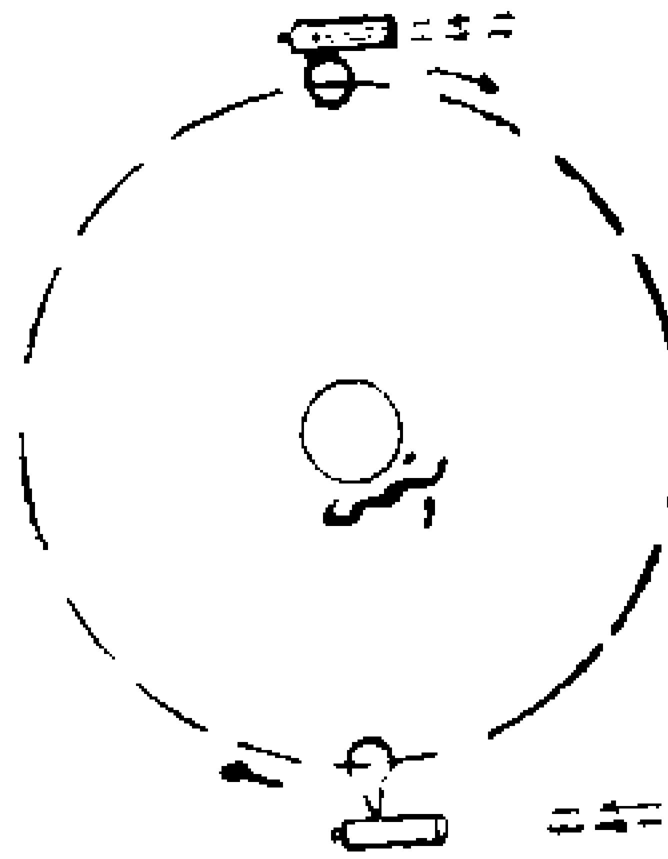
ولا يمكن بتجارب ضوئية تجرى في جملة عطالية تحديد الحركة الحقيقية لهذه الجملة بدلالة الاثير ، وذلك اذا اقتصرت هذه التجارب على تسجيل ظاهرة دوبلر فقط .

ب ـ تأثير الحركة على سرعة انتشار الموجة الضوئية :

اذا طبقنا تحويلات غاليله على حركة الامواج الضوئية وانتشرت الموجة الضوئية في جملة عطالية (م١) بسرعة (سر١) توازي المحور (س١) وتحركت الجملة (م١) بدلالة جملة عطالية ثانية (م) بسرعة سرَ توازي سر١ وتتجه في اتجاهها . حصلنا على سرعة انتشار الموجة (سر) بدلالة الجملة (م) :

$$\text{سر} = \text{سر}_1 + \text{سرَ}$$

نطبق العلاقة أعلاه على سرعة انتشار الامواج الضوئية الواردة الى الارض من نجم بعيد . نوجه النظارة الفلكية نحو النجم (شكل ٢٧)



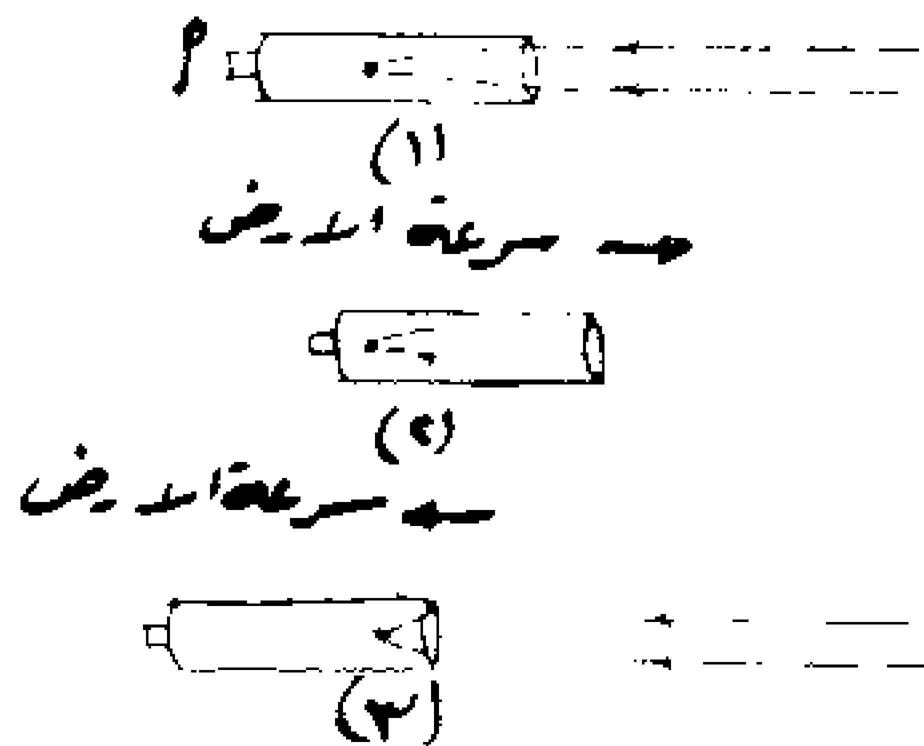
شكل ٢٧

عندما تكون الارض في وضع معين على مدارها حول الشمس . الاشعة الضوئية المتوازيـــة الآتية من النجم ترد الى جسمية النظارة موازيـــة لمحورها ، وتنكسر في هذه الجسمية . وتدخل النظارة متقاربة فتتجمع في نقطة داخلها تسمى ، محرق الجسمية .

فاذا كانت سرعة الارض على مدارها موازية لسرعة الامواج الواردة ومعاكسة لها في الاتجاه (الوضع (ب) شكل ٢٧) يرى الناظر النجم في هذه الحالة ، شرط أن يضع عينيه في نقطة تقع على مسافة صغيرة وراء المحرق، في الوضع (أ) مثلا (شكل ٢٨) لحظة وصول الامواج الضوئية الآتية من النجم الى جسمية النظارة • وتنقل حركة الارض العين بالمسافة (أ ق) في الفترة الزمنية اللازمة للاشعاعات الضوئية المنكسرة في الجسمية لتنتقل من الجسمية الى محرقها •

وفي الحالة التي تصبح فيها الارض في الوضع (حـ) المقابل قطريا للوضع (ب) تكون سرعتها عندئذ غير معاكسة في الاتجاه لسرعة الامواج الضوئية الواردة للنظارة •

وفي هذه الحالة لا يمكن للناظر أن يشاهد النجم فيما لو ابقى نظارته محكمة كما كانت عليه في الوضع (ب) وذلك لان حركة الارض تنقل العين بعيدا عن محرق الجسمية وتقطع العين المسافة (أ د) (شكل ٢٨ ــ ٣) في الفترة الزمنية اللازمة للاشعاعات الضوئية المنكسرة في جسمية النظارة لتنتقل من الجسمية الى محرقها (ق) •



شكل ٢٨

فاذا تحققت المناقشة أعلاه تجريبيا كان في تحقيقها دعم لنظريتين أساسيتين : الاولى نظرية وجود الاثير الساكن ، والثانية نظرية حركة الارض بدلالة هذا الاثير • وقام العالم آراغو (Arago) برصد نجم معين وحكم نظارته على هذا النجم فوجد ان نظارته تبقى محكمة على النجم وذلك في كافة أوضاع الارض على مدارها حول الشمس • وأثارت هذه النتائج السلبية دهشة وانتقادات العلماء • وأعاد آراغو تجربتـــه هذه على نظارة فلكية ملأها بالماء بغية الاقلال من سرعة انتشار الامواج الضوئية داخل النظارة ليؤدي ذلـــك الى فترة زمنية أطول لانتقـــال الاشعاعات المنكسرة من الجسمية الى محرقها وبالتالي الى انتقال أكبر للارض في هذه الفترة • وبالرغم من ذلك لم يحصل حتى في هذه الحالة على نتائج ايجابية اذ بقيت النظارة المحكمة في وضع من أوضاع الارض محكمة في كافة أوضاعها على المدار •

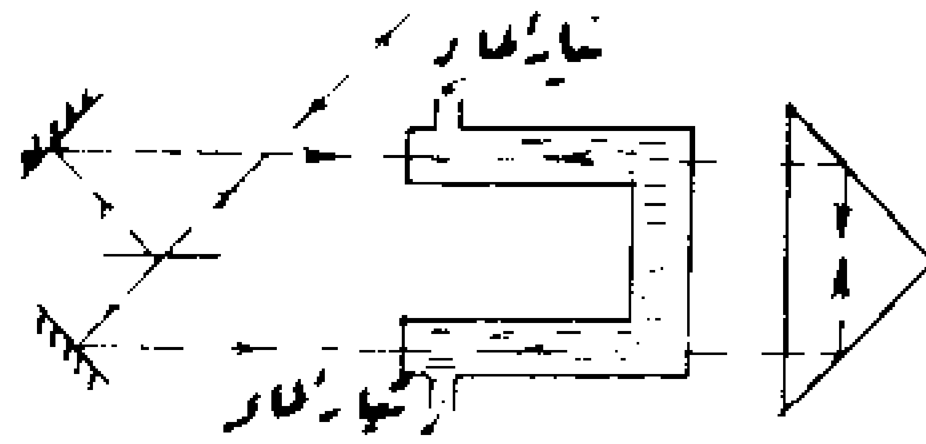
وبعد اجراء الحسابات الرياضية وجد العلماء ان الفارق النظري بين تحكيم النظارة في الوضع (ب) وتحكيمها في الوضع (حـ) هو فارق صغير من رتبة هـ $\frac{ع}{ن}$ اي من قبيل ١٠ ، وهذا البعد الصغير يمكن مشاهدته بالاجهزة المستعملة • وما ان اعلن اراغو نتائج تجاربه حتى اخذت الانتقادات على فرضية الوسط الاثيري الساكن تنهال من كل حدب •

وعكف العالم فرنل على دراسة هذه الظاهرة وانتهى الى ان الاثير المجاور للاجسام المادية المتحركة لا يبقى ساكنا بل يشترك جزئيـــا مع حركة الاجسام المادية المغمورة فيه • ووضع فرنل علاقات رياضيـــة دلل بواسطتها على ان الوسط الاثيري المجاور للمادة يتحرك بسرعة اقل من سرعة المادة وكانت العلاقة بين السرعتين :

$$سر_١ = \left(١ - \frac{١}{ن^٢}\right) سر$$

وترمز $سر_١$ الى سرعة الوسط الاثيري وسر الى سرعة الجسم المتحرك و (ن) الى قرينة انكسار الوسط الذي ينتشر فيه الضوء (ن > ١).

وحاول العالم فيزو (Fizeau) عام ١٨٥١ التحقق من علاقة فرنل ، فأجرى التجربة التاليـــة : أخذ فيزو انبوب معقوفا يجري داخله تيـــار من الماء بسرعة منتظمة (شكل ٢٩) ثم وجه حزمة ضوئية متوازية على



شكل ٢٩

صفيحة متوازية الوجهين نصف مفضضة فتفرعت الحزمة الواردة الى حزمتين دخلتا الانبوب المعقوف وسارت احداهما في اتجاه تيار الماء بينما سارت الثانية في اتجاه معاكس لتيار الماء ، وتداخلت الحزمتان البارزتان من الانبوب ، وتمكن فيزو بدراسة صورة التداخل ، استنتاج تأثير حركة الماء على سرعة الموجة الضوئية فوجد أن سرعة الماء لا تضاف الى سرعة الموجة كما يفرض ذلك كل من الميكانيك الكلاسيكي والاثير الساكن بل كان الاثير يتحرك مع الماء حركة جزئية بسرعة $سر_١ = \left(١ - \frac{١}{ن^٢}\right)$ سر وهي العلاقة النظرية التي وجدها فرنل •

وبادخال عامل الانسحاب الذي اقترحه فرنل على حركة الاثير تبين أن الفارق في تحكيم النظارة في مشاهدات اراغو يصبح بعد هذا التصحيح

صغيرا من رتبة $ه^{٢}$ أي من رتبة $١٠^{-٨}$ ولا يمكن للاجهزة الضوئية الدقيقة التي استعملها اراغو تسجيل مثل هذه المقادير الصغيرة •

وتطور علم الضـوء وتشعبت فروعه وأخذت ظواهر التـداخل والانعراج تلعب الدور الرئيسي ، فصنعت أجهزة التـداخل الدقيقة وأدخلت عليها التحسينات الفائقة وتم للعالم ميكلسون (Mickelson) صنع جهاز للتداخل بلغت دقة صنعه حدا كبيرا مكنه من تقدير المقادير الصغيرة من المرتبة الثانية ($ه^{٢}$) • وظن العلماء أن فرصة تعيين الحركة الحقيقية بدلالة الاثير قد قربت وقام مكلسون في أواخر القرن الماضي ، بتجارب حاسمة كانت نتائجها سلبية وضعت العلم في مأزق وفي هذه الآونة بالذات نشر العالم اينشتين نظرية النسبية التي قلبت المفاهيـم الكلاسيكية رأسا على عقب وأعطت مفاهيم جديدة لعلم الضوء كان من أهمها الاستغناء نهائيا عن فكرة وجود الوسط الاثيري المرن • وسوف نفرد فصولا خاصة لشرح هذه الآراء •

ح ــ تأثير الحركة على جهة انتشار الامواج الضوئية :

بينا في فقرة سابقة كيف تم للعالم الفلكي جيمس برادلي اكتشاف ظاهرة الحيود الضوئي (Aberration) وذكرنا في حينه كيف توصـل برادلي الى تعليل الظاهرة بالاعتماد على نظرية الاصدار • وحاول فرنل تعليل ظاهرة الحيود بالاعتماد على نظريته الموجية ولم يوفق الى ذلك الا بعد ادخال عامل الانسحاب في الوسط الاثـيري المجاور للمادة المتحركة •

وفي عام ١٨٧١ قام العالم آيري (Airy) بتجارب متعددة حاول فيها احداث ظاهرة الحيود الضوئي في منابع ضوئية تتحرك على سطـح الارض ، ولم تستطع الاجهزة الدقيقة تسجيل ظاهرة الحيود هـذه • وبعد الدراسة للحادثة تبين أن الحيود النظري ينبغي أن يكون في مثل

هذه الحالة صغيرا جدا من رتبة (هـ^{2}) • وقبل العلماء بهذه الدراسة لان الاجهزة الدقيقة المستعملة كانت قاصرة على تسجيل حيود صغير من رتبة (هـ^{2}) وخلصوا الى النتيجة التالية :

التجارب الضوئية المتعلقة بظاهرة الحيـود والتي تجري في جملة مقارنة عطالية لا تسمح بتعيين حركة هذه الجملة بدلالة الاثير •

النظرية النسبية في الضوء :

بعد هذه المطالعة السريعة لتأثـير حركة الجملة على تواتر اهتزاز الموجة الضوئية وسرعة انتشـارها وحيودها يمكن صياغة نظرية تعتبر بالمقارنة مع الميكانيك الكلاسيكي النظرية النسبية في الضوء ومفادها :

لا يمكن تعيين الحركة الحقيقية للجملة بدلالة الاثير ، بتجارب ضوئية تجرى في هذه الجملة ؛ ومن الممكن تعيين هذه الحركة فيما لو أعطينا أجهزة تجريبية دقيقة قادرة على تسجيل المقادير الصغيرة من المرتبة الثانية (هـ^{2}) •

الفصل السادس

المبادىء الاساسية في علم الكهرباء

نستعرض في هذا الفصل بعض المفاهيم الاساسية لعلمي الكهرباء والمغناطيسية لنصل بواسطتها الى الروابط الوثيقة التي تصل علم الضوء بهذين العلمين ولننتقل منها الى مفهوم جديد للوسط الاثيري وبالتالي الى فكرتي المكان والزمان •

الكهرباء الساكنة :

عرفت الظاهرة الكهربائية منذ القدم ولاحظ العلماء الاغريق انجذاب الاجسام الخفيفة الى قطع العنبر المدلوكة بالصوف •

غير أن البحث الجدي في علم الكهرباء لم يبدأ الا في مستهل القرن السابع عشر بعد الميلاد • حيث أجرى العالم الانكليزي غراي (Gray) تجارب عديدة تتعلق بانجذاب الاجسام الخفيفة كقطع الورق وكرات البيلسان الى قضبان زجاجية دلكت بقطعة من الحرير •

ولخص العالم غراي مشاهداته التجريبية في القانونين التجريبيين التاليين :

١ ــ تؤثر الاجسام المكهربة على ما يجاورها من الاجسام ، واذا وضعنا بجوار الجسم المكهرب ، وفي أوضاع مختلفة من هذا الجوار ، كرات خفيفة ، دلت التجربة أن تأثير الجسم المكهرب في هذه الكرات يكون مستقلا عن حالتها الكهربائية ويعتمد هذا التأثير فقط على الحالة الكهربائية للجسم المؤثر •

ب ــ اذا وضعنا في نقطة من جوار جسم مكهرب وعلى التوالي كرتي اختبار صغيرتين كانت نسبة تأثير الجسم المكهرب في الكرة الاولى الى تأثيره في الكرة الثانية مستقلة عن الحالة الكهربائية للجسم المؤثر وعن النقطة التي توضع فيها كرتا الاختبار ، وتعتمد نسبة التأثيرين فقط على الحالة الكهربائية لكرتي الاختبار •

وعرفت بعد ذلك الكهربائيــة الزجاجية ، السالبة ، والكهربائية الايبونيتية ، الموجبة • واكتشفت طرق عديدة للتكهرب : فكان التكهرب بالدلك والتكهرب بالملامسة والتكهرب بالتأثير • وعرفت بعدها الاجسام العازلة للكهربائية وهي الاجسام التي اذا كهربت في بقعة ما من سطحها بقيت الكهربائية متوضعة في هذا المكان لا تنتقل منه الى البقع الاخرى ، والاجسام الناقلة للكهربائيــة وهي الاجسام التي اذا كهربت في بقعة ما من سطحها انتقلت الكهربائية الى كافة نقط سطح الجسم •

واتجهت من ثم أبحاث العلماء الى دراسة الطبيعة الكهربائية وفي عام ١٧٤٧ نشر العالم الاميركي فرانكلن (Franklin) نتائــج تجرباته الكهربائية وضمنها فرضيته في البنية الكهربائية اذ قال : بوجود مائعين كهربائيين المائع الزجاجي السالب والمائع الايبونيتي الموجب ، ويدخل المائعان معا في بنية الاجسام كافة ، ويتساوى مقداراهما في الاجســـام المعتدلة كهربائيا •

واذا دلكنا قضيبا زجاجيا بقطعة حريرية انســاب المائع الزجاجي السالب من الزجاج الى الحرير ، ويكتسب بذلك القضيب الزجــاجي كهربائية موجبة بينما تصبح قطعة الحرير سالبة • وتكلم فرنكلن أيضا عن مبدأ مصونية الكهربائية اذ قال : لا تخلق الكهربائية ولا تفنى ، وكل ما تقوم به هو فصل المائعين الكهربائيين السالب والموجب ، عن بعضهما • ولم تلق فرضية المائعين الكهربائيين قبولا من العلماء ورأى بعضهــم

استبدالها بفرضية المائع الكهربائي الواحد مشبهين بذلك البنية الكهربائية بالبنية الحرارية التي كانت سائدة في ذلك العصر ، واقترحوا اعتبار الكهربائية مائعا ينساب من جسم الى آخر انسياب المائع الحراري من الجسم الحار الى الجسم البارد ؛ وفرض المائع الكهربائي الوحيد سالبا والجسم الذي يفقد بعضا من مائعه يصبح بالتالي جسما موجبا .

ثم تنبه العلماء الى ظاهرة التجاذب والتنافر الكهربائي فأعادوها الى انتشار المائع الكهربائي على شكل رذاذ ناعم جدا في الفضاء المحيط بالاجسام المكهربة . ويؤثر هذا الرذاذ بضغوط مختلفة على الاجسام التي يصادفها ويتسبب في انجذابها واندفاعها .

وتناولت المدرسة الكلاسيكية علم الكهرباء وحاولت أن تطبق عليه قوانين الميكانيك الكلاسيكية ، فدرست توازن وحركة الاجسام المكهربة ووجدت أن تلك القوانين لا تنطبق على الاجسام المكهربة الا اذا قبلنا بنشوء قوى من طبيعة خاصة دعيت بالقوى الكهربائية .

فالجسم المكهرب يؤثر في الاجسام المجاورة له بقوى كهربائية ويكون تأثير الجسم المكهرب في جواره تأثيرا لحظيا ولا حاجة لافتراض رذاذ ناعم ينبعث من الجسم المكهرب . كما أن التأثير الكهربائي اللحظي لا يحتاج الى وسط خاص ينقله بل ينتقل في الفضاء الخالي من المادة .

ولا يمكن تعيين القوى الكهربائية في جوار الجسم المشحون الا متى وضعنا في هذا الجوار أجساما مشحونة ، وفي سبيل تعيين هذه القوى اضطر العلماء الى تعريف واحدة الشحنة الكهربائية وصنعوا جهازا خاصا لقياسها سمي بالكشاف الكهربائي (Electroscope) وسميت هذه الواحدةبالفرنكلن (Franklin) ثم استبدلت حديثا بالكولون
والحق العدد الذي يقيس الشحنة الكهربائية الموجبة باشارة (+) كما ألحق العدد الذي يقيس الشحنة الكهربائية السالبة باشارة (—) .

ويختبر الفضاء المحيط بالجسم المشحون بتعيين القوى الكهربائية التي يؤثر بها هذا الجسم على كرات اختبار صغيرة شحنتها (+ ١) ونحصل بذلك على تمثيل هندسي للفضاء تحدده أشعة القوى الكهربائية الآنفة الذكر • واتفق العلماء على تسمية هذا التمثيل الهندسي « بالمجال الكهربائي » ودعيت القوى الكهربائية المميزة لهذا المجال « بشدة المجال الكهربائي » •

فالمجال الكهربائي بمفهوم العلماء الكلاسيكيين لم يكن سوى تمثيل هندسي للقوى الكهربائية التي تنشأ في الفضاء المحيط بالجسم المشحون ويتميز المجال الكهربائي بخاصتين أساسيتين الكمون (Potentiel) والطاقة (Energie) •

وفرق الكمون الكهربائي بين نقطتين (ب) و (حـ) من المجال الكهربائي يساوي بالقيمة المطلقة العمل الذي تبذله القوى الكهربائية المتولدة في المجال في نقل شحنة كهربائية (+ ١) من النقطة (ب) الى النقطة (حـ) ويقدر فرق الكمون الكهربائي بالفولط (Volt) •

أما الطاقة الكهربائية المخزونة في عنصر حجمي صغير من المجال الكهربائي فهي تتناسب طردا مع مربع شدة المجال في مركز هذا العنصر وتقدر الطاقة الكهربائة بالجول (Joule) •

وفي عام ١٧٨٥ وجد العالم كولون (Coulomb) قانونه التجريبي الخاص بتعيين قوى التجاذب والتنافر الكهربائي المتبادلة بين شحنتين كهربائيين ، وكان قانونه هذا مماثلا لقانون نيوتن في الجاذبية •

وجد كولون أن هذه القوى تتناسب طردا مع جداء الشحنتين وعكسا مع مربع المسافة بينهما • كما بين أن القوى الكهربائية تتجه على الخط الواصل بين مركزي الشحنتين وتكون اما جاذبة أو دافعة •

وساعـد قانون كولون في تحويل علم الكهرباء من علم فيزيائي تجريبي الى علم رياضي بحت ، وأخذت بعده النظريات الكهربائية تتوالى موضحة كافة خصائص المجال الكهربائي من شدة وفرق كمون وطاقة الى آخر ما هنالك من الخصائص الرياضية الفيزيائية •

المغناطيسيـة :

عرفت الظواهر المغناطيسية منذ القدم وذلك نظرا لاتصاف بعض فلزات الحديد بجذب القطع الحديدية الاخرى • وعندما بدأ العلماء دراسة الظواهر الكهربائية لاحظوا الشبه الواضح بين الظواهر الكهربائية والظواهر المغناطيسية ، فعادوا عنـدها لدراسة الخصائص المغناطيسية محاولين وضع علم للمغناطيسية على غرار علم الكهرباء •

ووجد العلماء فارقا أساسيـا بين الطبيعة الكهربائية والطبيعـة المغناطيسية فقد تم لهم فصل الكهربائية الموجبة عن الكهربائية السالبة بينما باءت كل محاولاتهم في فصل المغناطيسية الشمالية عن المغناطيسية الجنوبية بالفشل •

وتبين لهم في النتيجة أن كل ذرة مادية هي عبارة عن مغناطيس صغير له قطب شمالي وقطب جنوبي •

ويحدث كل قطب مغناطيسي في الفضاء المحيط به مجالا مغناطيسيا يشبه بخصائصه الهندسية المجال الكهربائي •

وطبق العلماء الكلاسيكيـون قوانينهم التحريكية على الظواهر المغناطيسية وعرفوا القوى المغناطيسية والكتلة المغناطيسية وشدة المجال المغناطيسي وفرق الكمون المغناطيسي الخ •••

ووضع العالم كولون قانونه التجريبي في حساب قوى التجاذب والتنافر المغناطيسي بين قطبين مغناطيسيين ، فكانت هذه القوى تتناسب طردا مع جداء الكتلتين وعكسا مع مربع المسافة الفاصلة بينهما •

وساعد أيضا قانون كولون في تحويـل علم المغناطيسية من علم تجريبي الى علم رياضي •

التيار الكهربائي :

اكتشف العالم الايطالي غالفاني (Galvani) عام ١٧٨٦ سريان تيار كهربائي في الاسلاك المعدنة وتم للعالم فولط (Volt) عام ١٨٠٠ توليـد التيار الكهربائي • ومن المستحيل مشاهدة التيار الكهربائي ذاته وانما يستدل على وجوده من آثاره العديـدة وهي الاثر الحراري والاثر الكهربائي والاثـر المغناطيسي وبحث العالم جول (Joule) في الاثـر الحراري للتيار الكهربائي ووضع القانون المعروف باسمه ويحدد هذا القانون كمية الحرارة التي تنتشر في الناقل بمرور تيار كهربائي فيه •

وأجرى العالم أوم (Ohm) تجارب عديدة درس فيها تأثير نوعيـة السلك الناقل وشكله الهندسي على جريان التيار الكهربائي فيه ثم وضع أوم نفسه القوانين العامة للدارات الكهربائية •

وفي عـام ١٨٢٠ اكتشف العالم الدنمركي اورستـد (Oersted) التأثير المغناطيسي للتيار الكهربائي عندما شاهد انحراف الابرةالمغناطيسية الموضوعة بجوار سلك كهربائي يجري فيه التيار •

ودرس العالمان بيو (Biot) وسافـار (Savart) الظاهرة الجديـدة وأوصلتهم دراساتهم الرياضية الىقوانين تعين خصائص المجال المغناطيسي المتولد عن تيار كهربائي مستمر •

وفي عام ١٨٢١ اكتشف العالم امبير (Ampère) تكافؤا بين التيـار الكهربائي والمغناطيس اذ وجد أن التيار الكهربائي الذي يجري في حلقة مغلقة يكافىء وريقة مغناطيسـة •

وفتح امبير باكتشافه هذا بابا جديدا في العلم تناول الروابط الوثيقة

بين الكهرباء والمغناطيسية وسمي هـذا العلم الجديد بالكهرطيسية (électromagnétisme) •

ووضع العالم الانكليزي فارادي (Faraday) القواعـد الاساسية لهذا العلم •

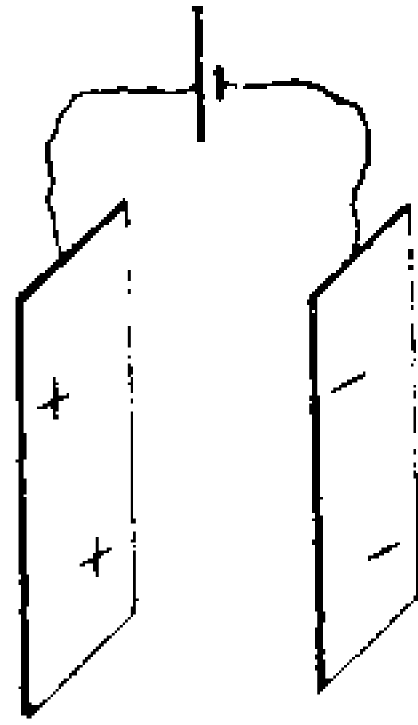
فارادي : (Faraday)

لم يكن فارادي ضالعـا في الرياضيات اذ كانت معلوماته النظرية محدودة للغاية وقد نشأ هذا العالم نشأة وضيعة . لم يتلق دروسا في المدرسة ، اذ كان أبوه معوزا وتوفي تاركا أرملة وعددا من اليتامى كان فارادي أكبرهم سنا • فانصرف للعمل اليدوي واستخدمه صاحب مكتبة كلفه بتجليد بعض الكتب القديمة • وكان فارادي صبيا نيرا يحب القراءة والمطالعة فقرأ معظـم مؤلفات العالـم البيولوجي تاتـوم (Tatum) واطلع على مؤلفات العالم الكيميائي ديفي (Davy) وأعجب بها فلخصها وتقدم بملخصه للمؤسسة الملكية التي كان يشرف على ادارتها العالم ديفي نفسه ، وأعجب المدير بنشاط الشاب وذكائه المتوقد واقترح تعيينه محضرا لمخبره ثم أخذه برفقته بجولة على جامعات أوربا • وهناك وقف فارادي على التقدم العلمي الرائع وزار أحدث المخابر وبمجرد عودته الى انكلترا انكب على اجراء التجارب والتحريات الكيميائية ونشر بين عامي ١٨١٦ و ١٨١٨ اربعين بحثا علميا مبتكرا وعين عام ١٨٢٥ مديرا لمخابر المؤسسة الملكية وأخذت شهرته تنتشر في أصقاع أوربا •

ورغم أعماله الكثيرة كان فارادي لا يترك بحثا علميا ينشر الا ويطلع عليه ويحاول تحقيقه بالتجربة في مخبره وفي ذات يوم وقع بين يديه بحث علمي للعالم الكيميائي نيكلسون (Nickelson) يتعلق بالتأثير الكيميائي للتيار الكهربائي •

واهتم فارادي بهذه النشرة ووجد فيها أفقا واسعا لتقدم وتطور

علم الكيمياء واضطر عنده لدراسة علم الكهرباء ، وكعادته عاد وقرأ كل ما كان نشر عن هذا العلم • وبعد أن أنهى دراساته لخص ما طالعه وصنف النظريات والفرضيات المتعددة ولفت نظره ماحوته هذه النظريات من المتناقضات • ووقف طويلا عند فرضية التأثير الكهربائي ولم ترق له فيها فكرة التأثير المحفي عن بعد وحاول نقضها وعندما لم ينجح انصرف عنها الى دراسة التأثير الكيميائي للتيار الكهربائي • فأخذ صفيحتين معدنيتين متماثلتين ووصلهما بقطبي مولد للتيار الكهربائي المستمر (شكل ٣٠) فلاحظ توضع شحنات كهربائية موجبة على سطح احدى



شكل ٣٠

الصفيحتين وشحنات كهربائية سالبة على سطح الصفيحة الثانية وكانت هذه الظاهرة معروفة سابقا . وتسمى مجموعة الصفيحتين بالمكثفة وتسمى الصفيحتان بلبوسي المكثفة ، وتتميز المكثفة بسعتها الكهربائية وبالشحنة الكهربائية المتوضعة على كل من اللبوسين . وفرق الكمون الكهربائي بين اللبوسين وهو يساوي فرق الكمون الكهربائي بين قطبي المولد المربوط بالمكثفة ، وسعة المكثفة تساوي نسبة شحنتها الى فرق الكمون بين لبوسيها •

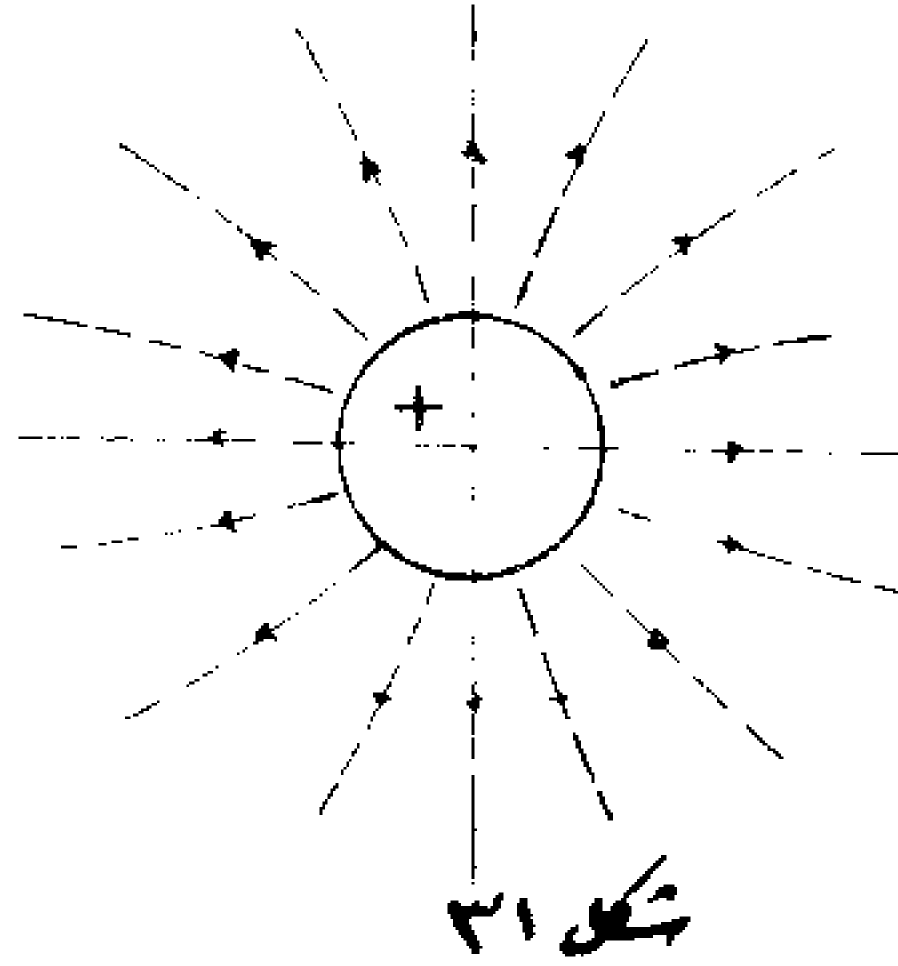
غمر فارادي مكثفته الموصولة بالمولد في سائل عازل للتيار الكهربائي كالبترول مثلا ، فلم يشاهد تفكك السائل انما اكتشف ظاهرة جديدة ، فقد تبين له أن الشحنة المتوضعة على كل من لبوسي المكثفة قد ازدادت عما كانت عليه قبل غمر المكثفة في السائل العازل بينما وجد أن فرق الكمون الكهربائي بين لبوسيها بقي محافظا على قيمته السابقة ؛ وقال فارادي : « لا بد اذا وأن يكون للمادة العازلة الموضوعة بين لبوسي المكثفة تأثيرا على سعة هذه المكثفة » ، فعـاد من جديد الى دراسـة العوامل التي من شأنها التأثير في سعة المكثفة ، فوجد أن سعة المكثفة تعتمد في أساسها على ظاهرة التأثير الكهربائي ؛ وهنا وجد نفسه يدور في دائرة مفرغة ولا بد للخروج منها من توضيح جذري لظاهرة التأثير الكهربائي •

وبعد مناقشة مركزة توصل فارادي الى النتيجة التالية :

« لا يمكن للتأثير الكهربائي أن ينتشر لحظيا الى كافة نقط الفضاء ، وانما ينتقل التأثير الكهربائي من قريب الى أقرب عبر المادة العازلة بسرعة محدودة وللمادة العازلة أثر فعال في نقل التأثير الكهربائي ••• ولا تؤثر الشحنة الكهربائية على شحنة كهربائية ثانية الا اذا لعب الوسط الذي يمثل الفضاء والفاصل بين الشحنتين دورا أساسيا في نقل هذا التأثير ، وسرعة انتقال التأثير سرعة محدودة » •

ولم ينجح فارادي في اثبات فرضه الجديد رياضيا انما اكتفى باعطاء صورة رمزية لهذه الظاهرة • تصور الكون مملوءا بمادة مرنة شديـدة المرونة واذا وضعت شحنة كهربائية في بقعة من هذه المادة أحدثت في المكان الموضوعة فيه ثقبا ونتج عن حدوث هذا الثقب تبدل في المادة المرنة من شأنه توليد قوى مرونة في نقاط المادة المحيطة بهـذا الثقب وتكون هذه القوى مماسة لخطوط تنطبق على الخيوط المرنة المشكلة لهذه المادة وسميت هذه الخيوط بخطوط القوى وتنبع خطوط القوى

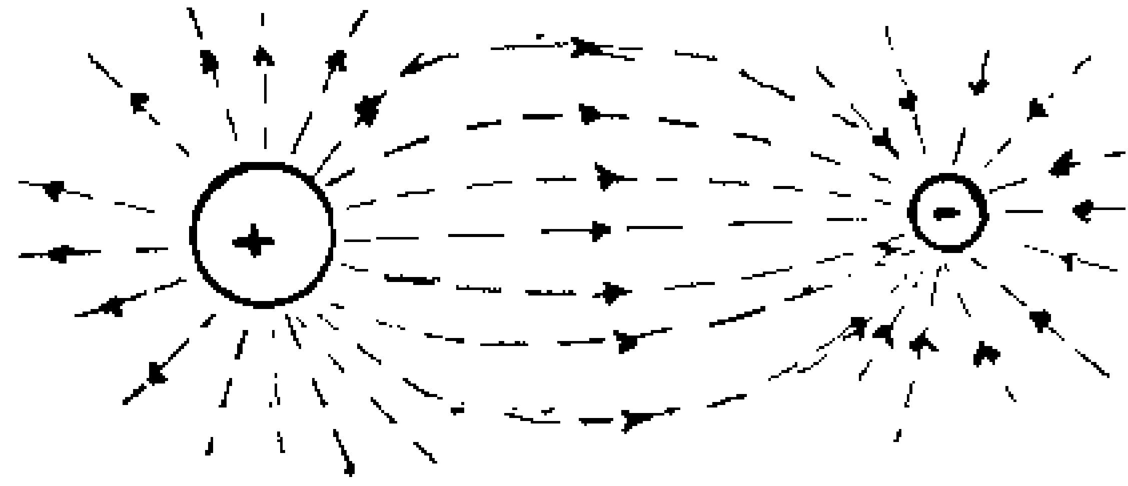
من محيط الثقب المحدث في المادة المرنة وتتوزع في الفضاء المحيط به وتشكل بمجموعها خاصية أساسية لهذا الفضاء . وما المجال الكهربائي المتولد عن الشحنة الكهربائية الا تمثيلا لمجموعة هذه الخطوط . وتنقل خطوط القوى التأثير الكهربائي الى نقط الفضاء المجاورة (شكل ٣١) .



شكل ٣١

فاذا وضعنا في الفضاء المرن هذا شحنة كهربائية ثانية أحدثت هذه الشحنة ثقبا ثانيا في المادة ، وينشأ عنه وجود مجال كهربائي ثان يمثل بمجوعة جديدة من خطوط القوى وتنشأ بين خطوط قوى المجالين أفعال متبادلة تشابه الافعال المتبادلة بين القوى المرنة . ويستقر التوازن على مجموعة جديدة من خطوط القوى تمثل المجال الكهربائي المحصل الناتج عن الشحنتين . واذا اختلفت الشحنتان بالاشارة اندمجت خطوط القوى في المنطقة الواقعة بين الشحنتين وشكلت خطوطا تنبع من الثقب الموجب لتصب في الثقب السالب (شكل ٣٢) .

واستبدل فارادي بفرضه الجديد المفهوم الهندسي للمجال الكهربائي بمفهوم فيزيائي تحدد خطوط القوى خواصه وطبيعته . فخطوط القوى



شكل ٣٢

المرنة تكون مماسة للقوى الكهربائية وتنبعث من نقط السطح الخارجي للجسم المشحون ايجابيا لتنتهي على نقط السطح الخارجي للجسم المشحون سلبيا • وحتى يؤيد فارادي نظريته في أن الشحنات الكهربائية لا تظهر الا على السطح الخارجي للنواقل المشحونة ، صنع صندوقا كبيرا غلفه بصفائح معدنية وجلس داخله مستصحبا معه بعض الاجهزة الكهربائية الدقيقة ووصل الصندوق بمولد كهربائي قوي ، وشحن الصندوق بالكهربائية ، غير أن فارادي لم يشعر بأي تأثير كهربائي على الاجهزة الكهربائية التي كانت معه •

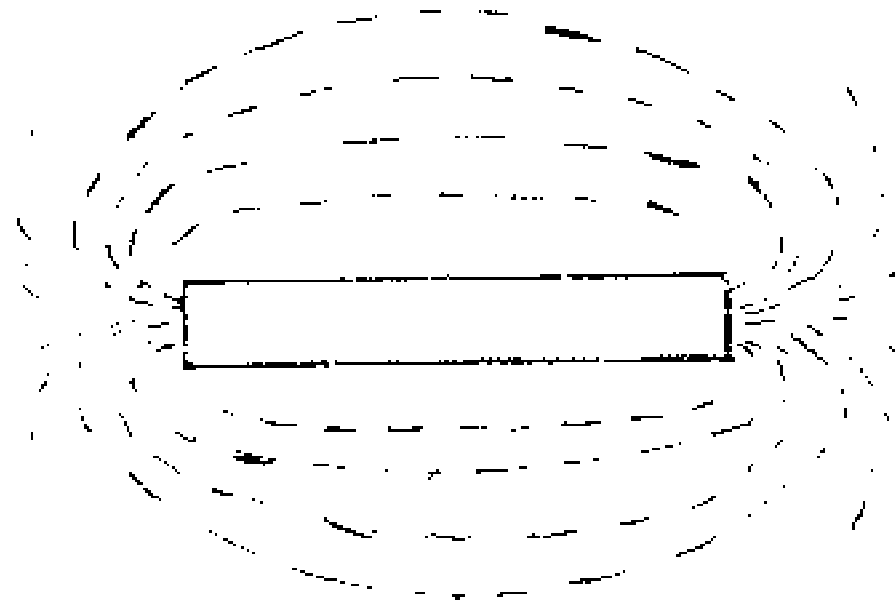
وخلص من هذه التجربة بالنتيجة التالية : لا يمكن للتأثير الكهربائي أن ينتشر لحظيا ، وينتقل هذا التأثير من قريب الى أقرب بواسطة خطوط القوى التي لا تنشأ الا في الاجسام العازلة ، وتنقطع هذه الخطوط عند السطح الخارجي للجسم الناقل المغمور في المادة العازلة ، وحيث لا توجد خطوط قوى لا يمكن أن ينتشر التأثير الكهربائي •

وقوبلت فرضية فارادي بالنقد اللاذع وطلب العلماء منه أن يعلل لهم انتقال التأثير الكهربائي في الخلاء التام •

وأجابهم فارادي على طلبهم هذا بأن فرض الفضاء مملوءا بمادة مرنة عازلة تغمر الكون تدخل الى فراغات الاجسام المادية أطلق عليها اسم « الاثير الكهربائي » وقال بأنه يقوم بعمل المادة العازلة •

وثارت ثائرة العلماء على هذا الفرض الجديد فهم ما زالوا يعانون الامرين من فرضية الاثير الضوئي وبنيته واذا بفارادي يقترح ملء الكون بوسط أثيري آخر يعمل على نقل التأثيرات الكهربائية . وبعد مناقشات عديدة رفض العلماء فرضية فارادي وتمكنوا من تعليل تأثير العازل على سعة الناقل المغمور فيه بادخالهم عاملا ثانيا جديدا على قانون كولون أسموه بعامل التأثير الكهربائي وكان هذا العامل يختلف من وسط عازل الى آخر ويساوي « الواحد » في الخلاء التام .

ولم يبال فارادي بانتقادات زملائه وبقي مصرا على فرضه وطبقه على المجال المغناطيسي وعرف خطوط القوى المغناطيسية ونجح هذه المرة في رسم صورة واقعية لهذه الخطوط عندما ذر برادة الحديد على ورقة موضوعة فوق قضيب مغناطيسي طويل (شكل ٣٣) .



شكل ٣٣

وظهرت خطوط القوى التي كانت تنبعث من أحد القطبين لتنتهي الى القطب الثاني وبين فارادي تأثير نوعية الوسط المحيط بالمغناطيس على خطوط القوى وبالتالي على المجال المغناطيسي .

وعلل العلماء هذه الظاهرة الجديدة بادخال ثابت جديد على قانون كولون أطلقوا عليه اسم « عامل النفوذ المغناطيسي » وكان هذا العامل يختلف من وسط الى آخر ويساوي « الواحد » في الخلاء التام .

الكهرطيسية :

ما ان كشف العالـم امبير التطابق بين التيارات الكهربائية الحلقية والوريقات المغناطيسية حتى اقترح بعض العلماء الاستغناء عن فكرة المائع المغناطيسي والاكتفاء فقط بالمائع الكهربائي ووصلوا بعدها الى النتيجة التالية :

اذا كان المائع الكهربائي ساكنا أحدث في الفضاء المحيط به مجالا كهربائيا واذا كان المائع الكهربائي متحركا أحدث عندها في الفضاء المحيط به مجالا مغناطيسيا •

ووضح امبير هذه الظاهرة عندما قال :

« يولد التيار الكهربائي الذي يسري في سلك ناقل ، في الفضـاء المجاور لهذا السلك مجالا مغناطيسيا • واذا وضعنا بجوار السلك الاول سلكا آخر يجري فيه تيار كهربائي تأثر التيار الثاني بالمجال المغناطيسي المتولد عن التيار الاول • ويعمل هذا المجال في تغيير سرعة تدفق التيار الثاني زيادة او نقصانا » •

وخطر عندها للعلماء السؤال التالي : اذا كان المجال المغناطيسي يؤثر في تغير سرعة تدفق التيـار الكهربائي ، أفلا يمكنه يا ترى دفع الكهربائية الساكنة الى الحركة ؟

وفي عام ١٨٣١ وجد فارادي الجواب على السؤال وأثبت بتجارب قاطعة أن المجال المغناطيسي الثابت لا يستطيع دفع الكهربائية الساكنة الى الحركة وبمجرد أن يتحول المجال المغناطيسي المؤثر على الكهربائية الساكنة تتحرك هذه الكهربائية وتحدث تيارا كهربائيا •

وسمي التيار الكهربائي المولد بهـذه الطريقة بالتيار الكهربائي المتحرض •

واستطاع في هذه المرة صياغة القوانين الكمية للظاهرة الجديدة

واستند في اشتقاق قوانينه على فرضية خطوط القوى ووجد أن القوانين الكمية للظاهرة الجديدة تشابه تماما القوانين الكمية التي وجدها بيوو سافار والمتعلقة بالمجال المغناطيسي المتولد عن تيار كهربائي مستمر .

نظريات ماكسويل : (Maxwell)

كان ماكسويل عالما رياضيا فذا اهتم اهتماما بالغا بالظواهر الكهربائية وأعجب كثيرا بفرضيات فارادي الجريئة فتناولها وحاول ترجمتها الى علاقات رياضية كمية .

واطلع ماكسويل على مصادفة رياضية غريبة وجدها العالم ويبر (Weber) عندما طبق قوانين بيووسافار على حساب شدة التيار الكهربائي المار في سلك معين ثم طبق قوانين فارادي في حساب شدة التيار المحرض المار في ذات السلك في شروط فيزيائية متماثلة فوجد ويبر أن الشدة التي تحسب بقوانين بيووسافار لا تساوي الشدة التي تحسب بقوانين فارادي وانما كانت هنالك نسبة ثابتة بين قياسي الشدتين تساوي سرعة انتشار الضوء في الخلاء .

ووجد ماكسويل في هذه المصادفة الرياضية سرا لا بد أن تكتشفه المناقشة الفيزيائية للظاهرة ، فأخذ خطوط القوى التي فرضها فارادي وحاول صياغة قوانينها الكمية .

تخيل سلكا مرنا متجانسا ومنتظما محدد الكثافة والمرونة يؤثر عليه شد معين فوجد ماكسويل بالدراسة الرياضية للظاهرة أن الاضطراب الحادث في نقطة من السلك ينتشر من قريب الى أقرب بسرعة محدودة على طول هذا السلك وتوصل الى النتيجة التالية : « اذا كان السلك المرن مشابها من الوجهة الفيزيائية لخطوط قوى فارادي كانت سرعة انتشار الاضطراب عليه ممثلة بعلاقة رياضية هي نسبة شدة التيار محسوبة

من قانون بيووسافار الى شـدته محسوبة من قانون فارادي وتكون هذه السرعة مساوية بالتالي الى سرعة انتشار الاهتزازات الضوئيـة في الخلاء » .

وسبق لفارادي أن أعـاد انتشار التأثير الكهربائي الـى اهتزاز « الخيوط المرنة » المؤلفة للوسط ، فاذا كان هذا الوسط خلاء تاما وجب ملؤه بوسط جديد هو الاثير الكهربائي ؛ وها ان ماكسويل يجد ان هذا الاثير ينبغي أن يتصف من حيث المرونة والمتانة بخواص الاثير الضوئي . وخلص ماكسويل من هذه الدراسة الى أنه ليس من الضروري ادخال وسط مرن جديد يختص بنقل الاهتزازات الكهربائية انما يقوم الاثير الضوئي ذاته بنقل هذه الاهتزازات التي تنتشر في هذا الوسط بسرعة انتشار الاهتزازات الضوئية فيه ، وتنبأ ماكسويل عن وجود الاهتزازات الكهربائية العرضانية العالية التواتر وأسماها بالموجـة الكهرطيسية وأكد أخيرا بأن الضوء ليس في الحقيقية سوى ظـاهرة كهرطيسية ووضع معادلاته الشهيرة التي حددت العلاقة بـين الوسط الناقل للتأثير الكهرطيسي وكل من المجالـين الكهربائي والمغناطيسي الناشئين في هذا الوسط .

وتنبأ ماكسويل عن امكانية اختراق التيار الكهربائي لكافة الاوساط العازلة التي تسمح للاشعاعات الضوئية بالمرور منها وعزا عدم مشاهدة هذه التيارات الى المقاومة الكبيرة لهذه الاوساط وقال بامكانية تحقيق ذلك اذا أمكن عكس جهة التيار الكهربائي بتواتر سريع للغاية .

ابحاث هرتز :

وانتظر العلماءعشرين عاما حتى تم للعالم هرتز (Hertz) تحقيق نبوءة ماكسويل بتجارب هامة للغاية أحدث فيها الموجة الكهرطيسية التي نقلت التيارات العالية التواتر عبر المواد العازلة بسرعة تساوي سرعة انتشار الموجة الضوئية عبر هذه الاوساط .

وتابع هرتز أبحاثه فحصل على أمواج كهرطيسية لا يتعدى طولها ٢ مليمتر وهي أمواج غير مرئية تقع في المنطقة تحت الحمراء وأمكن تداخلها وانعراجها واستقطابها الى آخر ما هنالك من خواص الموجة الضوئية •

ووافق العلماء على قبول الاثير الكهرطيسي باعتباره الوسط المرن الذي يملأ الفضاء ويدخل الى الفراغات الذرية في الاجسام المادية وينقل الاهتزازات الكهرطيسية من ضوئية وكهربائية ومغناطيسية الخ ••• الا أنهم انهمكوا مجددا في دراسة بنية هذا الوسط •

وتصدى لهم هرتز قائلا :

« يمكن لكافة الاوساط المادية بما فيها الاثير أن تنتقل من حالة السكون الى حالة اضطراب ، نسميه كهربائي أو مغناطيسي أو كهرطيسي ••• وغاية العلم تكمن في دراسة الظواهر الناتجة عن الاضطراب دون الالتفات الى طبيعة الاوساط المادية الناقلة لهذا الاضطراب » •

وأرسى هرتز قواعدا جديدةللبحث العلمي وسميت مدرسته بالمدرسة الواقعية وسادت في تلك الحقبة الفكرة التالية :

« يمكن تحديدالحالة الفيزيائية للوسط الاثيري بمقدارين فيزيائيين: المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي ويرتبط المقداران في المكانوالزمان بمعادلات ماكسويل » •

وانتقل بعدها هرتز الى دراسة تأثير حركة الاجسام المادية على الموجة الكهرطيسية ليصل بنتيجتها الى مفهوم أوضح لفكرتي المكان والزمان •

تأثير حركة الاجسام المادية على الامواج الكهرطيسية :

الموجة الضوئية هي موجة كهرطيسية عالية التواتر •

والخواص المميزة للموجة الكهرطيسية هي تواتر اهتزازها وسرعة انتشارها وجهة انتشارها .

بينا في الفصل السابق تأثير الحركة على خصائص الموجة الضوئية ووجدنا في حينه ضرورة الاخذ بنظرية فرنل القائلة بوجـوب اشتراك الوسط الاثيري جزئيا بحركة المادة المغمورة فيه . ولم ترق هذه الفرضية للعالم هرتز واعتقد باشتراك الاثير كليا بحركة الاجسام المغمورة فيه وحاول تأييد اعتقاده بالتجارب الكهربائية المغناطيسية الدقيقة فعاد الى معادلات ماكسويل وأدخل فيها بعض التعديلات بغية تطبيقها على الاجسام المتحركة وبنى معادلاته الجديدة على فرضية انسحاب الاثير كليا مع المادة . وطبق معادلاته على الحالات التالية :

١ ــ نواقل متحركة : آ) في مجال كهربائي .   ب) في مجال مغناطيسي .

٢ ــ عوازل متحركة : آ) في مجال كهربائي .   ب) في مجال مغناطيسي .

ففي حالة النواقل المتحركة حصل هرتز على نتائج تجريبية مطابقة تماما لنظرياته بينما حصل فارق ملموس بين النتائج التجريبية والواقع النظري في حالة العوازل المتحركة .

وتوصل هرتز بعد الدراسة الى نتيجة هامة مفادها « انه من غير الممكن تعيين حركة الجملة العطالية بتجارب كهرطيسية تجرى فيها ، الا اذا تمكنا من قياس المقادير الصغيرة من المرتبة الثانية (هـ^{٢}) » وسميت هذه النتيجة بالنظرية النسبية في الكهرطيسية .

ولم تحظ فرضيات هرتز على قبول العلماء وعدت فاشلة لانها لـم توفق الى تعليل الظواهر الكهرطيسية في الاجسام العازلة المتحركة . وفي

هذه الفترة بالـذات بزغ نجم العالم الهولندي لورنتز (Lorentz) الذي تناول أبحاث هرتز وأدخل عليها الاصلاحات الضرورية وفتـح الطريق للعالم اينشتين كي ينشر نظريته النسبية ٠

البنيـة الكهربائية للمادة :

تكلمنا في بداية هذا الفصل عن طبيعة الكهرباء ومررنا بسرعة على فرضية المائعين وذكرنا كيف استبدلت بعدها هذه الفرضية بفرضية المائع الكهربائي الواحد ، التي سادت حتى أواخر القرن التاسع عشر ٠

ففي عام ١٨٥٨ اكتشف العالم بلوخر (Blutcher) **الاشعة المهبطيـة** (rayons cathodiques) وظن في البدء أنها اشعاعات ضوئية حتى أتى العالم كروكس (Croockes) عام ١٨٧٩ ودرسها فوجدها عبارة عن قذائف مادية تنبعث من المهبط ٠ وتناولها بعده العالم طمسن (J. J. Tompson) ودرس خصائصها فوجدها عبارة عن جزئيات كهربائية سالبة ، تمكن من قياس النسبة بين شحنة وكتلة كل جزئية منها ، وبرهن على ثبـات هذه النسبة واستطاع العالم الامريكي ميليكيان (Milikian) عام ١٩١٠ من قياس شحنة الجزئية المهبطية التي كانت قد دعيت بالذرة الكهربائية وأطلق عليها اسم الكهروب أو الالكترون ٠

واستفاد العالم لورنتز من أبحاث كروكس وطمسن ووضع النظرية الذرية الكهربائية للمادة ٠ قال : تتوضع الكهربائية الموجبة داخل الذرات المادية وتبقى هذه الكهربائية مرتبطة بالمادة بينما يوجد في الذرة بضع كهارب سالبة ، وتتعادل الكهربائية السالبة مع الكهربائية الموجبة ٠ ففي الاجسام العازلة للكهرباء تكون الكهارب السالبة على اتصال كهربائي وثيق بالذرات المادية واذا حدث وتحركت هذه الكهارب فهي لا تبتعد كثيرا عن الكهربائية الموجبة وفي هذه الحالة نقول ان الذرة استقطبت فأصبحت ثنائية كهربائية ٠ وتولد الثنائية الكهربائية في الفضاء المحيط

بها مجالا كهربائيا خاصا . أما في الاجسام الناقلة للكهرباء فيكون الاتصال الكهربائي بين الذرات الايجابية والكهارب السالبة ضعيفا بحيث يكون لبعض هذه الكهارب الحرية التامة في التجول بين ذرات المادة لا يقاومها في حركتها الا بعض الاحتكاكات الناتجة عن اصطدام الكهارب المتحركة بالذرات المادية وهذه الاحتكاكات تحدد ما عرف بالمقاومة الكهربائية للمـــادة .

وعلل لورنتز الظاهرة المغناطيسية عــلى النحو التالي : في ذرات بعض الاجسام المادية تتحرك الكهارب السالبة على مدارات مغلقة فتؤلف بحركتها هذه وريقات مغناطيسية لها قطبها الجنوبي وقطبها الشمالي ، وتنتظم هذه الوريقات في ترتيب معين يضفي على المادة صفتها المغناطيسية . وانتهى لورنتز الى القول بأن كل من الكهارب السالبة والذرات الموجبة تسبح في البحر الاثيري وتولد فيه بنتيجة حركتها المجالات المغناطيسية والمجالات الكهربائية .

وتوصل بنتيجة دراساته الى علاقات رياضية شبيهة الى حد بعيد بعلاقات ماكسويل ، وتميزت على هذه الاخيرة بكونها توصلت الى تعليل كافة الظواهر الكهرطيسية التي فشلت في تعليلها علاقات هرتز المشتقة من علاقات مكسويل ، وتكلم لورنتز عن طبيعة الوسط الاثيري النـــاقل للاهتزازات الكهرطيسية فقال : يتعين هذا الوسط بالطاقة الكهرطيسية المخزونة فيه بسبب وجود المجـــالين الكهربائي والمغناطيسي ، ويبقى الوسط الاثيري ساكنا اطلاقا في الفضاء الكوني وفي جوار الاجسام المادية المتحركة .

وبينت معادلات لورنتز أنه لا يمكن تعيين حركة الاجسام المــادية بدلالة الوسط الاثيري الساكن بتجارب ضوئية او كهربائية او مغناطيســية تجري في هذه الجمل الا اذا تمكنا من قياس المقادير الصغيرة من المرتبة

الثانية (هـ^{2}) : ومن المستحيل بالتالي تعيين الحركة الانسحابية للارض بتجارب كهرطيسية تجري على سطحها الا اذا أوتينا الاجهزة القادرة على تسجيل المقادير من مرتبة (10^{-8}) •

وتطرق لورنتز بعدها الى دراسة الكتلة الكهرطيسية او العطالة الكهرطيسية •

الكتلة الكهرطيسية : (masse électromagnétique)

استعرضنا في فصل سابق المبادىء الاساسية للميكانيك الكلاسيكي وأرجعنا بموجبها الظواهر الميكانيكية الى مكان ساكن أسميناه بالمكان المطلق وحددناه بجملة مقارنة خاصة وبينا امكانية التعرف على المكان المطلق تجريبيا وقلنا بأن الحركة المتسارعة تولد نوعا من القوى وهي القوى العطالية ، يدل نشوءها على الحركة الحقيقية بدلالة المكان المطلق •

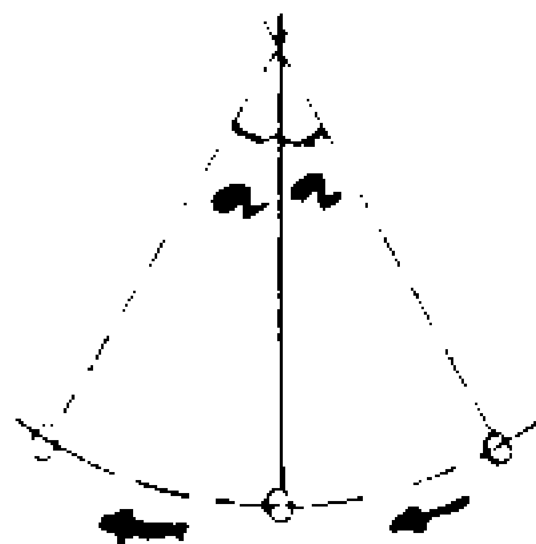
ودرسنا بعدها الظواهر الكهرطيسية وأرجعنا نشوءها الى حالة فيزيائية خاصة للوسط الاثيري الساكن • وأبى العلماء الا أن يفتشوا عن العلاقة بين الظواهر الميكانيكية والظواهر الكهرطيسية علهم يعيدون احداها للاخرى ويجمعون عندها فكرتي المكان المطلق الساكن والوسط الاثيري الساكن في مفهوم واحد • فاذا تم لهم البرهان على أن الظواهر الميكانيكية ليست سوى نوع خاص من الظواهر الكهرطيسية كانت عندها القوى العطالية الدالة على وجود المكان المطلق عبارة عن تعديلات فيزيائية في الوسط الاثيري ، تنشأ نتيجة تغير معين في المجالات الكهربائية والمغناطيسية أو بالاصح نتيجة تحول معين للطاقة الكهرطيسية المختزنة في الاثير •

ونجح العلماء في محاولتهم اذ وجدوا في الظواهر الكهرطيسية مقدارا

فيزيائيا كانت له خصائص الكتلة العاطلة التي بنيت عليها الظواهر الميكانيكية •

فالكتلة العاطلة في الميكانيك الكلاسيكي هي العمل الدال على قصور المادة التي لا يمكنها أن تتحرك من تلقاء ذاتها •

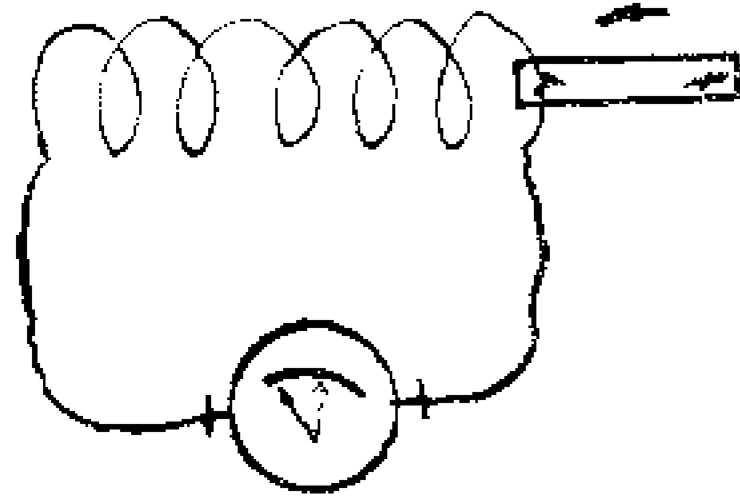
وتعمل الكتلة العاطلة في خزن الطاقة المبذولة على المادة لتصرفها من جديد عندما تدعو الضرورة لذلك • فالنواس الذي يسقط على قوس الدائرة من ارتفاع معين لا يقف عندما يصل الى وضع توازنه الشاقولي (شكل ٣٤) بل يتابع حركة الصعود الى الجهة المقابلة ويبذل أثناء



شكل ٣٤

صعوده الطاقة التي تكون كتلته قد خزنتها أثناء هبوطه • كذلك الدولاب الذي يدار حول محور عمودي على مستويه لا يقف بمجرد زوال القوة المديرة له انما يتابع دورانه فترة من الزمن يصرف أثناءها الطاقة التي سبق لكتلته أن خزنتها أثناء تأثير القوة عليه وتدعى الطاقة المخزونة بالطاقة الحركية •

وقد لاحظ العلماء ظاهرة مماثلة في التجارب الكهربائية • نأخذ بكرة نلف عليها سلك ناقل عددا كبيرا من اللفات ، نصل طرفي السلك الى مقياس غلفاني دقيق (شكل ٣٥) نأتي بقضيب مغناطيسي ونحركه الى داخل الوشيعة فيؤدي تحول المجال المغناطيسي الى نشوء مجال كهربائي



شكل ٣٥

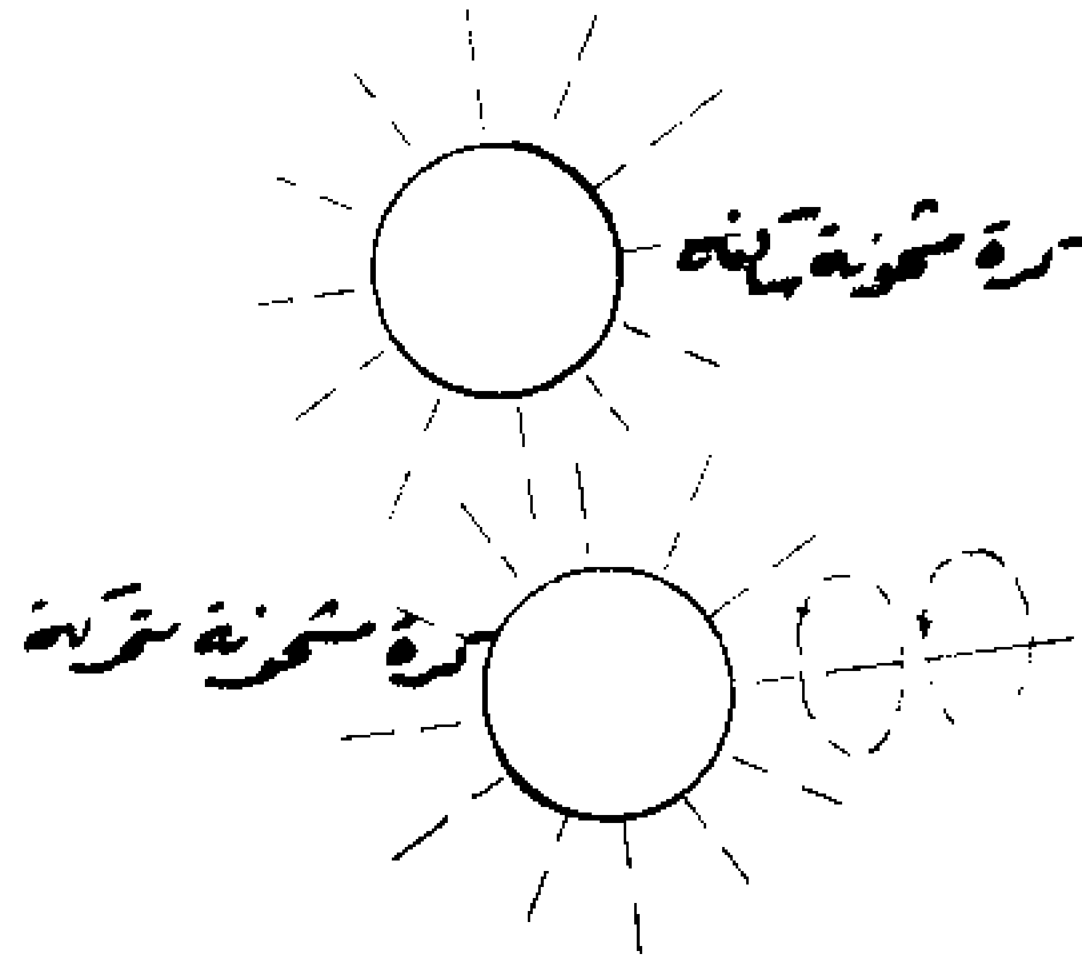
يدفع بكهرب السلك الى الحركة فيجري تيار كهربائي في سلك الوشيعة يمكن مشاهدته بانحراف ابرة المقياس الغلفاني . واذا أوقفنا المغناطيس عن الحركة وجدنا أن التيار الكهربائي المار في سلك الوشيعة ما زال يجري تماما كما تابع الدولاب حركته رغم زوال القوة المحركة له ، فهنالك اذا طاقة كهرطيسية بقيت مخزونة في الوشيعة .

ونعلل ذلك بقولنا ان للوشيعة عطالة كهرطيسية .

والمثال التالي يوضح لنا مفهوم العطالة الكهرطيسية ، اذا دفعنا كرة غير مشحونة بصدمة معينة اكسبتها هذه الصدمة سرعة (سر) تتناسب عكسا مع الكتلة العاطلة للكرة ولكن ما عساه يحدث لو شحنا الكرة بالكهرباء ثم صدمناها ؟

تولد الكرة المشحونة والساكنة في الفضاء المحيط بها مجالا كهربائيا ساكنا تمثله خطوط قوى مستقيمة تصدر ناظمية على الكرة من نقط سطحها (شكل ٣٦) . فاذا صدمنا الكرة وتحركت ولدت الشحنات المتحركة مجالا مغناطيسيا تحيط خطوط قواه بخطوط قوى المجال الكهربائي المتحرك . وعندما تكون الكرة ساكنة بدلالة الاثير يكون للمجال الكهربائي الساكن قيمة معينة كما يكون المجال المغناطيسي معدوما ويحدد المقداران حالة فيزيائية خاصة للاثير المحيط بالكرة .

فاذا تحركت الكرة نشأ مجال مغناطيسي يؤثر بدوره في المجـال الكهربائي وتتحول بالتالي الحالة الفيزيائيـة للوسط الاثيري وتحدد تحولاتها الطاقة الكهرطيسية المخزونة فيه . والطاقة مصونة لا تخلق من



شكل ٣٦

العدم لذلك يساوي تغير الطاقة الى عمـل اضافي ينبغي أن يبذل على الكرة المشحونة لتتابع حركتها بسرعة تساوي السرعة التي تكسبها فيما لو كانت معتدلة .

وعليه نقول : تحتاج الكرة المشحونة الى صدمة أكبر حتى تكتسب سرعة مساوية لسرعة الكرة غير المشحونة ، والفـارق بين الصدمتـين لا يذهب سدى وانما يختزن في الاثير على شكل طاقة كهرطيسية .

أما نحن فنترجم الظاهرة بقولنا ان عامل عطالة الكرة المشحونة هو أكبر من عامل عطالة الكرة عندما لا تكون مشحونة .

ويسمى الفارق بين العطالتين بالعطالة الكهرطيسية للمجال . وحسب

لورنتز هذه العطالة فوجدها تتناسب مع الطاقة الكهرطيسية المخزونة في المجـال :

$$ك = \frac{٤}{٣} \frac{قد}{ث^٢}$$

حيث ترمز (ك) الى العطالة الكهرطيسية (قد) الى الطاقة الكهرطيسية و (ث) : لسرعة الضوء • فالشحنة الكهربائية قاصرة بحد ذاتها لا يمكنها أن تتحرك تلقائيا بدلالة الاثير الساكن واذا دفعت للحركة قاومت هذه الحركة بعامل يدل على عطالتها الكهرطيسية •

وظن لورنتز ان كتلة (او عطالة) الكهروب يمكن ان تكون كلها ذات منشأ كهرطيسي فهذه الكتلة تعود الى حركة الكهروب بدلالة الاثير • فشبه الكهروب بكرة صغيرة مشحونة وطبق عليها القوانين فحصل على عطالة كهرطيسية تساوي الكتلة العاطلة التي قاسها ميليكيان (Milikian) وطبق حساباته أيضا على الذرة الايجابية وحسب عطالتها الكهرطيسية فوجدها مساوية لكتلتها العاطلة المقاسة بالطريقة الحركية • وعندها نادى لورنتز بالفرضية التالية : المادة هي في الحقيقة تجمع كهربائية ايجابية وسلبية فاذا تحركت بدلالة الاثير أحدثت فيه تبدلا فيزيائيا تحدده الطاقة الكهرطيسية التي يمكن قياسها بعطالتها • والعطالة الكهرطيسية هي عامل تأثير الوسط الاثيري على المادة وهي التي تعين لنا حركة المادة بدلالة الاثـير •

ويكون لورنتز قد توصل بفرضيته هذه الى اعتبار الظواهر الميكانيكية جزءا من الظواهر الكهرطيسية وأصبح بذلك المكان المطلق الذي فرضه نيوتن فرضا لا لزوم له اذ أخذ مكانه الوسط الاثيري الساكن الذي أصبح وسطا فيزيائيا ملموسا يحدد المجال الكهرطيسي كافة خصائصه •

ويأخذ القانون النسبي الكلاسيكي الشكل العام التالي :

« لا يمكن بتجارب ميكانيكيــة أو ضوئية أو كهربائيــة تجري في الجملة المتحركة تعيين حركة هذه الجملة بدلالة الاثير الساكن الا اذا تمكنا من تسجيل المقادير الصغيرة من المرتبة الثانية (هـ٢) » .

ولم تعمر الفرضيات الجديــدة طويلا اذ وجدت ظواهر فيزيائية لا يمكن تعليلها بالمفاهيــم الجديدة ، ورغم ذلك بقي مفهــوم الطاقة الكهرطيسية وعطالتها ساريا وأصبح حقيقة علمية أساسية أعطاها العالم اينشتين مفهوما جديدا في نظريته النسبية .

واستند اينشتين في أبحاثه على نشرات علمية كان العالم لورنتز قد أصدرها عام ١٩٠٤ .

ونترك مناقشة هذه المفاهيم للفصول القادمة .

* * *

الفصل السابع

تجارب ميكلسون ومورلي (Mickelson et Morley)

في السنوات الاخيرة من القرن التاسع عشر وفيما كان العلماء منهمكين في انجاز الترتيبات الاخيرة في بنيان العلم وهم مرتاحين الى أن الاسس التي يبنون فوقها أصبحت قواعد راسخة لا تستطيع هدمها أية ظاهرةفيزيائية جديدة : في هذه الفترة بالذات قام العالم الامريكي ميكلسون (Mickelson) بتجربة فيزيائية أحدثت بنتائجها ثورة في التعاليم القائمة وزعزعتها فوجد العلماء أنفسهم أمام أحد أمرين اما تعليل النتائج التجريبية بالاعتماد على الفرضيات والمفاهيم القائمة أو طرح هذه المفاهيم والفرضيات جانبا والتنقيب عن فرضيات أخرى أصلح منها وأثبت .

كانت النظرية النسبية الكلاسيكية تقضي بعدم امكانية تعيين حركة الجملة بدلالة الاثير الساكن الا متى استطعنا الحصول على أجهزة فائقة الدقة تسمح بتسجيل المقادير الصغيرة من المرتبة الثانية ($هـ^٢$) .

وفي عام ١٨٨٤ حاول العالم ميكلسون تعيين الحركة الانسحابية للارض بدلالة الاثير الساكن ظنا منه أن جهازه قادر على تسجيل المقادير الصغيرة من المرتبة الثانية ($هـ^٢ = ١٠^{-٨}$) .

وقبل شرح مراحل تجربة ميكلسون يجدر بنا أن نعود مجددا الى المفاهيم الكلاسيكية التي بنيت عليها هذه التجربة .

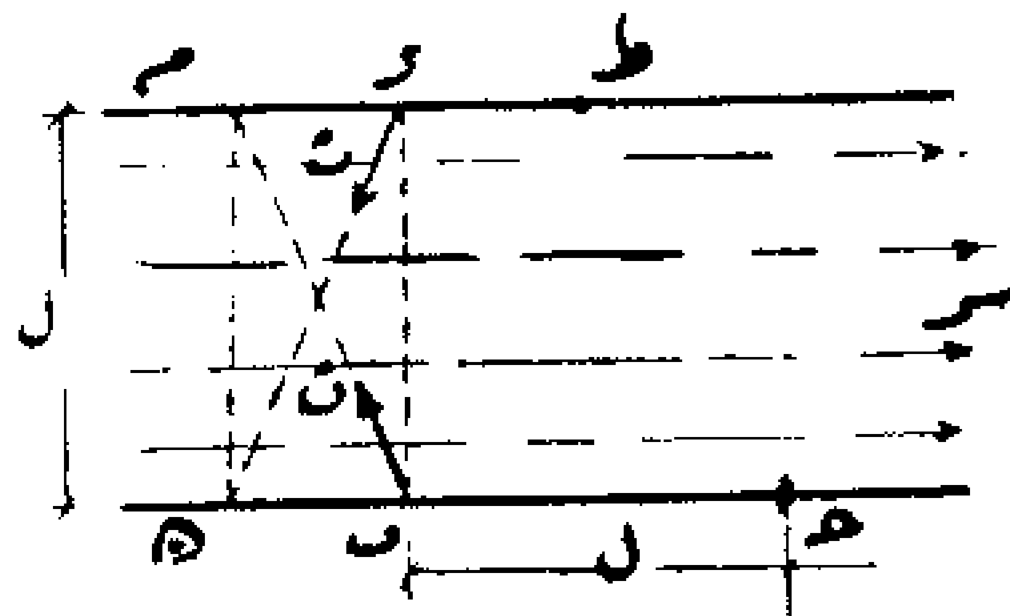
تتخيل نهرا يجري فيه بانتظام تيار ماء سرعته (س) (شكل ٣٧) ولنفرض سباحا يريد الذهاب من (ب) الى (حـ) في اتجاه تيار الماء ويعود بعدها أدراجه من (حـ) الى (ب) .

وسباحاً آخر يذهب من (ب) الى (ى) ويعود ادراجـــه بعدها من (ى) الى (ب) ، بفرض الخط (ب ى) يعامد تيار الماء و (ب ح = ب ى = ل) ولنفرض ان السباحين يبذلان جهداً واحداً يكتسبان بنتيجتـــه سرعة منتظمة (ث) (ث > س) .

الزمن الذي يضيعه السباح الاول في ذهابه من (ب) الى (ح) هو $\frac{ل}{ث + س}$ والزمن الذي يضيعه هذا السباح في عودته من (ح) الى (ب) هو $\frac{ل}{ث - س}$ والفترة الزمنية اللازمة لرحلة الذهاب والاياب هي :

$$ز_1 = \frac{ل}{ث + س} + \frac{ل}{ث - س} = \frac{2 ل ث}{ث^2 - س^2}$$

واذا توجه السباح الثاني نحو (ى) في ذهابه من (ب) دفعه عندها التيار بعيداً عن (ى) ووصل في النهاية الى نقطة مثل (ط) . لذلك حتى يصل هـذا السباح مباشرة الى (ى) وجب أن يتوجـه نحو النقطة (م) نظيرة (ط) بالنسبة للنقطة (ى) وفي طريق العودة من (ى) الى (ب) ينبغي أن يتوجـه نحو النقطة (م) بشكل يكون معه (م م) موازياً لـ (ب ى) (شكل ٣٧) وبتطبيق نظرية



شكل ٣٧

تركيب الحركات على حركة الاياب والذهاب بين (ب) و (ى) نحصل على الفترة الزمنية اللازمة لقضاء مرحلتي الذهاب والاياب* .

$$ز_٢ = \frac{٢ ل}{\sqrt{ث^٢ - سر^٢}}$$

ويبدو جليا أن الفترة الزمنية $ز_١$ لا تساوي الفترة الزمنية $ز_٢$ والفارق بين الفترتين هو :

$$ز_١ - ز_٢ = ٢ ل \left[\frac{ث}{ث^٢ - سر^٢} - \frac{١}{\sqrt{ث^٢ - سر^٢}} \right]$$

$$= \frac{٢ ل}{ث} \left[\frac{١}{١ - هـ^٢} - \frac{١}{\sqrt{١ - هـ^٢}} \right]$$

بفرض $هـ = \frac{سر}{ث}$

---

* $م ى = سر ز$ ، $ب م = ث ز$ (بفرض ز هو زمن الذهاب من ب الى ى)

$$\overline{م ب}^٢ = \overline{م ى}^٢ + \overline{ب ى}^٢$$

$ث^٢ ز^٢ = سر^٢ ز^٢ + ل^٢$ ومنه $ل^٢ = ز^٢ (ث^٢ - سر^٢)$

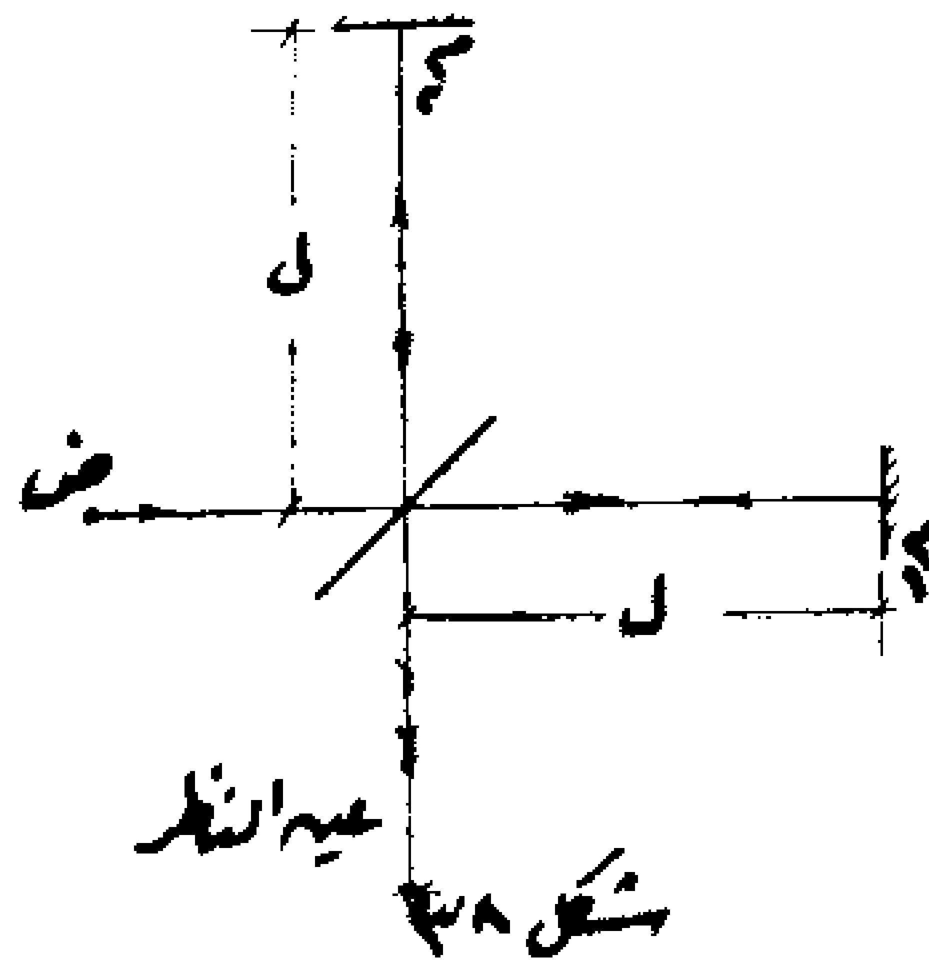
ومنه $ز = \frac{ل}{\sqrt{ث^٢ - سر^٢}}$. وزمن الذهاب من ب الى ى يساوي زمن الرجوع من ى الى ب .

والمقدار ($1 - هـ^2$) الموجب والاصغر من الواحد هو أصغر من جذره التربيعي $\sqrt{1 - هـ^2}$ وبالتالي يكون المقدار $\frac{1}{1 - هـ^2}$ أكبر من $\frac{1}{\sqrt{1 - هـ^2}}$ والزمن $ز_1$ أكبر من الزمن $ز_2$ •

ولكن ما علاقة ما تقدم بتجربة ميكلسون ؟

تتحرك الكرة الارضية حركة انسحابية في الفضاء فاذا كان الاثير ساكنا وجب أن تكون سرعة الارض بدلالته هي (س) والشخص الموجود على سطح الارض لا يشعر بحركتها الانسحابية هذه • وظن ميكلسون أن جهاز التداخل الضوئي الفائق الحساسة يمكن أن يسجل هذه الحركة •

يعتمد جهاز ميكلسون على تداخل حزمتين ضوئيتين ويسجل هذا الجهاز فرقا في المسير الضوئي بين الحزمتين المتداخلتين ويساوي فرق المسير جداء سرعة الضوء (ث) بالفارق الزمني بين فترتي انتشار الحزمتين (شكل ٣٨) •



شكل ٣٨

يرسل منبع ضوئي (ض) حزمة ضوئية متوازية على مرآة مائلة نصف مفضضة (ف) فتنقسم الحزمة الى حزمتين تنتشر الاولى في اتجاه الحركة الانسحابية للارض وترد على المرآة ($م_{١}$) وتنعكس عليها ثم ترد من جديد على المرآة نصف المفضضة وتنعكس عنها متجهة نحو عين الناظر • أما الحزمة الثانية فهي تنتشر عمودية على حركة الارض الانسحابية وترد على المرآة ($م_{٢}$) وتنعكس عنها ثم ترد من جديد على المرآة نصف المفضضة فتخترقها متجهة الى عين الناظر حيث تتداخل الموجتان •

بعد المرآة ($م_{١}$) عن الصفيحة نصف المفضضة يساوي بعد المرآة ($م_{٢}$) عن هذه الصفيحة •

وحركة الموجة الاولى الموازية لحركة الارض تشبه حركة السباح الذاهب من (ب) الى (حـ) كذلك تشبه حركة الموجة الثانية العمودية على حركة الارض حركة السباح الذاهب من (ب) الى (ى) •

والفارق الزمني بين الموجتين المتداخلتين في عين الناظر يجب أن يكون :

$$ز_{١} - ز_{٢} = \frac{٢ ل}{ث} \left(\frac{١}{١ - هـ^{٢}} - \frac{١}{\sqrt{١ - هـ^{٢}}} \right)$$

وفرق المسير بين الموجتين يساوي ($ز_{١} - ز_{٢}$) ث أي :

$$٢ ل \left(\frac{١}{١ - هـ^{٢}} - \frac{١}{\sqrt{١ - هـ^{٢}}} \right)$$

وباهمال المقادير الصغيرة من رتبة $هـ^٤$ وما فوق * يكون فرق المسير بين الحزمتين المتداخلتين مساويا ($ل هـ^٢$) • فهذا الفرق هو من رتبة ($١٠^{-٨}$) وعليه ينبغي على جهاز ميكلسون أن يسجل فرقا في المسير أصغر بمئة مليون مرة من البعد بين المرآة المائلة نصف المفضضة والمرآة ($م_١$) أو ($م_٢$) •

وكان الجهاز بواقع تصميمه صالحا لتسجيل فروق في المسير اصغر بكثير من هذه القيمة •

وبعد التمحيص في صورة التداخل لم يلاحظ ميكلسون أي فارق في المسير وظن ان النتائج التجريبية السلبية ربما عادت الى أخطاء في التجريب فانضم اليه العالم مورلي (Morley) وأدخلا معا تحسينات فائقة على الجهاز المذكور •

وكان جهازهما الجديد يصلح لتحديد تيار الاثير حتى ولو كانت السرعة الانسحابية للارض لا تتعدى خمس كيلومترات في الثانية الواحدة •

---

* $\frac{١}{١ - هـ^٢} = ١ + هـ^٢$ بعد اهمال المقادير الصغيرة من رتبة $هـ^٤$ وما فوق .

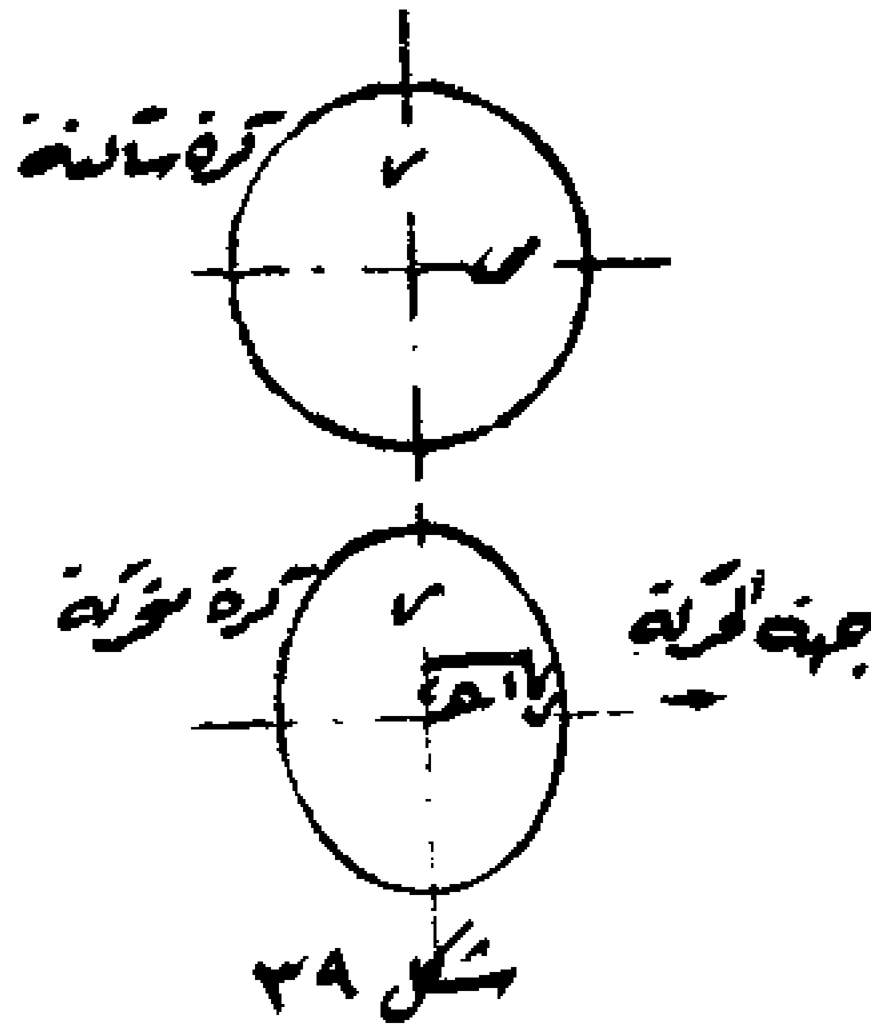
$\frac{١}{\sqrt{١ - هـ^٢}} = ١ + \frac{١}{٢} هـ^٢$ بعد اهمال المقادير الصغيرة من رتبة $هـ^٤$ وما فوق .

وعليه يكون $\frac{١}{١ - هـ^٢} - \frac{١}{\sqrt{١ - هـ^٢}} = \frac{هـ^٢}{٢}$

ورغم ذلك لم يسجل الجهاز الجديد أي فارق في المسير بين الموجتين المتداخلتين وبالتالي أي تيار للاثير .

وسببت نتائج ميكلسون ضربة قاصمة لفرضيات فرنل وهرتز ولورنتز ، ووقع العلماء في حيرة من أمرهم ، وخاب ظنهم بعد أن كانوا قد بنوا الآمال الجسام في وصولهم أخيرا الى الحقيقة العلمية المحتومة وشعر لورنتز بقرب تصدع نظريته الكهربائية التي كان قد بناها على السكون المطلق للاثير ، فنشر عام ١٨٩٢ بحثا حاول فيه تعليل النتائج السلبية لتجربة ميكلسون .

قال لورنتز : المادة مؤلفة من ذرات موجبة وسالبة وهي عبارة عن كرات مشحونة ، فاذا تحركت هذه الكرات تحول شكلها الى مجسم قطع ناقص يكون محوره الصغير في اتجاه الحركة (شكل ٣٩) .



شكل ٣٩

فاذا كان (ر) هو نصف قطر الكرة المشحونة الساكنة أصبح طول المحور الصغير لمجسم القطع الناقص المتحرك ٢ر $\sqrt{١ - هـ^٢}$ وتؤدي

الحركة الانسحابية للارض الى تقليص طول الذراع (ف $م_١$) الموازي لحركة الارض ويصبح طوله ل $\sqrt{١ - هـ^٢}$

وتضيع عندها الموجة الضوئية في ذهابها وايابها على الذراع (ف$م_١$) زمنا $ز_١$ قيمتـه :

$$ز_١ = \frac{٢ ل \sqrt{١ - هـ^٢}}{١ - هـ^٢} = \frac{٢ ل}{\sqrt{١ - هـ^٢}}$$

وفي هذه الحالة يساوي هذا الزمن زمن ذهاب واياب الموجـة الضوئية على الذراع (ف $م_٢$) ، ويصبح بالتالي الفارق الزمني بـين الموجتين المتداخلتين معدوما ويؤدي الى فرق مسير معدوم ولا تتأثر صورة التداخل بحركة الارض فلا يسجلها الجهاز .

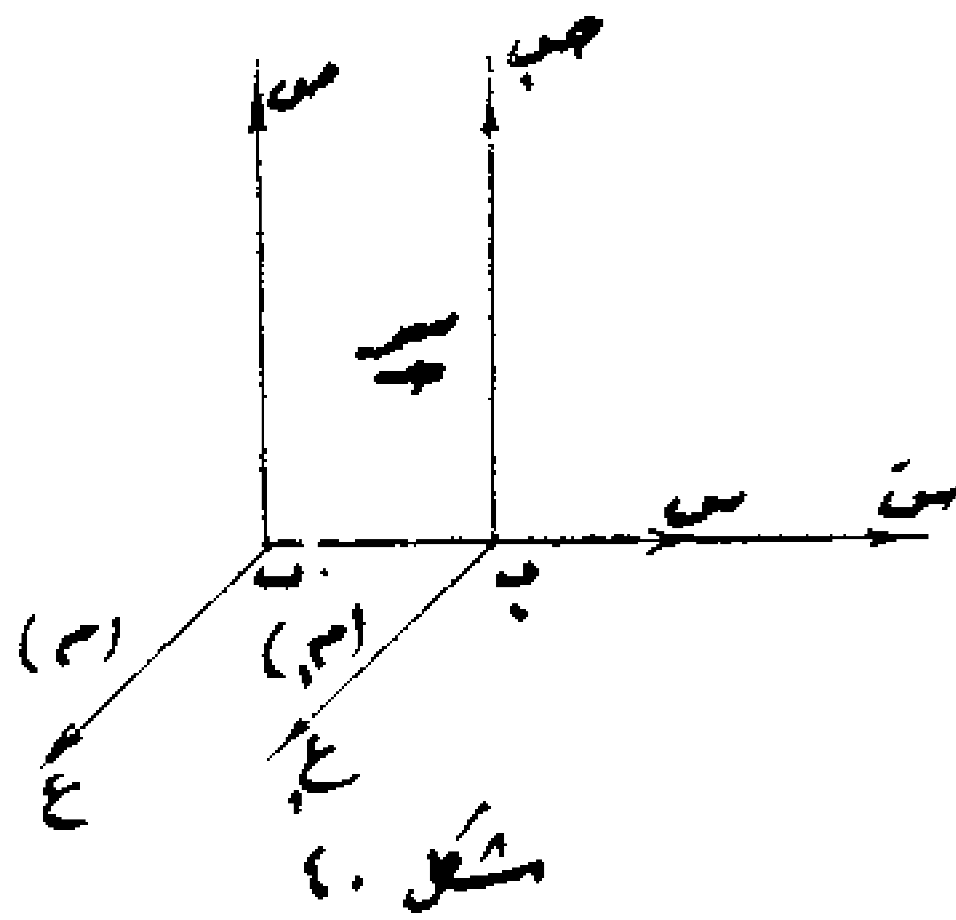
وأجاب لورنتز على سؤال خاص بقياس الاطوال في الجملة المتحركة قـال : لا يمكن للمجرب المتحرك مع الجهاز الشعور بتقلص الذراع (ف $م_١$) وذلك لانه يقيس الاطـوال بمسطرة تتحرك مـع الجهاز . وتتقلص هذه المسطرة بدورها بذات نسبـة تقلص الذراع ولا تؤثر نوعية مادتها على مقدار التقلص لانالتقلص مبني على بنية الكهرباء وهي متماثلة في كافة المواد لا تأثير للنوعية عليها .

ولم يقبل العلماء بفرضية التقلص وكانت حجتهم في ذلك ان عامل التقلص هذا أدخل خصيصا بغية تعليل نتائج تجربة ميكلسون فقط وكل تعديل يقترح في سبيل تعليل ظاهرة معينة لا يمكن القبول به على أنـه فرض عام .

ونشر لورنتز عام ١٩٠٤ تحويلاته الشهيرة والتي ما زالت تعرف حتى اليوم بتحويلات لورنتز وكانت غاية هذه التحويلات اعطاء معـادلات ماكسويل شكلا متماثلا في كافة الجمل العطالية . تماما كمـا كانت

تحويلات غاليله تعطي قوانين التحريك الكلاسيكي شكلا متماثلا في كافة هذه الجمل .

فاذا اعتبرنا جملتين عطاليتين (م) و (م_1) تتحركان بحركة نسبية انسحابية منتظمة سرعتها (سر) (شكل ٤٠) وانطبق مبدءا الجملتين في اللحظة ز = صفر . تأخذ عندها معادلات ماكسويل شكلا متماثلا في الجملتين م و م_1 شرط تطبيق تحويلات لورنتز على الاحداثيات وهذه التحويلات هي :



شكل ٤٠

$$\text{س}_1 = \frac{\text{س} - \text{سر ز}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}}$$

$$\text{ع}_1 = \text{ع} \text{ ، } \text{ص}_1 = \text{ص}$$

$$\text{ز}_1 = \frac{\text{ز} - \frac{\text{س سر}}{\text{ث}^2}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}}$$

بينما كانت تحويلات غاليله في الميكانيك الكلاسيكي هي :

$$\text{س}_1 = \text{س} - \text{سر ز}$$

$$\text{ع}_1 = \text{ع}$$

$$\text{ص}_1 = \text{ص}$$

$$\text{ز}_1 = \text{ز}$$

وكانت تحويلات لورنتز مجرد تحويلات رياضية لا تستند الى أي مفهوم فيزيائي ثابت وتشتمل هذه التحويلات على فكرتين جديدتين :

الاولى استعمال مقاييس مختلفة لقياس الاطوال في كل من الجملتين العطاليتين ، والثانية استعمال مقاييس مختلفة للازمنة في كل من الجملتين ، ويعني ذلك تجهيز كل جملة عطالية متحركة بساعة خاصة بها .

لقد نقض لورنتز بمعادلاته الجديدة مفهوم المكان المطلق والزمان المطلق دون أن يعمد الى استبدالهما بمفهوم آخر وكانت أزمنته الجديدة المقترحة مجرد تحويلات رياضية اقتضتها الظروف التجريبية . وساعدت تحويلات لورنتز على وضع نص جديد عام لمبدأ النسبية « لا يمكن تعيين حركة الجملة بدلالة الاثير بتجارب ميكانيكية أو ضوئية أو كهربائية تجري في هذه الجملة ، وتحافظ القوانين الفيزيائية على أشكالها البسيطة في مختلف الجمل العطالية شرط أن تطبق عليها تحويلات لورنتز ويحق لكل مجرب الادعاء بثبات جملته ولا توجد طرق تجريبية أو نظرية تخالف ادعاءاته » .

وقد وضع مبدأ النسبية هذا الوسط الاثيري الساكن في موقف حرج ، تماما كما سبق لمبدأ النسبية في الميكانيك الكلاسيكي ان وضع المكان المطلق لنيوتن في مأزق .

فالجملة التي نراها نحن ساكنة بدلالة الاثير تبدو لسوانا متحركة بدلالته ، والوسط الذي يبدو ساكنا ومتحركا في ذات الوقت هو وسط يكون وجوده كعدم وجوده .

وخشي لورنتز الافصاح بالحقيقة نظرا لما كان لنظرية الاثير من جذور عميقة في العلم ، فالوسط الاثيري لم يقترح الا لسد حاجة العلماء الى وسط قادر على نقل الاهتزازات : الضوئية والكهرطيسية في الفضاء الخالي من المادة .

واخيرا قال لورنتز : بدلا من ان املىء الفضاء الخالي بوسط مادي مرن ساكن أدعوه الاثير ، أخص هذا الفضاء الخالي ببعض الصفات

الفيزيائية يضفيها عليه المجال الكهرطيسي . وهذا المجال كفيل لوحده بنقل الاهتزازات الكهرطيسية من قريب الى أقرب بسرعة محدودة تساوي ٣٠٠ ٠٠٠ كم/ثا •

وتلاشى الوسط الاثيري وحافظت المفاهيم النظرية على كيانها السابق واستبدلت كلمة الاثير بكلمة المجال الكهرطيسي •

واضطر العلماء الى قبول تحويلات لورنتز الا انهم طالبوا بتعليلاتها الفيزيائية ، ولم يطل انتظارهم اذ لم تمض سنة واحدة حتى نشر العالم اينشتين نظريته النسبية عام ١٩٠٥ فكانت البلسم الشافي للعقول وانقشعت بفضلها الغشاوة السوداء التي سببتها التعاليم المدرسية ومن بعدها التعاليم الكلاسيكية •

وسوف نشرح في الباب الثاني من هذا الكتاب نظريت اينشتين بتطبيقاتها ونتائجها •

* * *

الباب الثاني

النظرية النسبية

شرحنا في الباب الاول من هذا الكتاب المبادىء الاساسية للعلوم الفيزيائية الكلاسيكية . وكانت غايتنا الاولى في ذكرها مساعدة القارىء على فهم نظريات اينشتين .

من المسلم به ان الثورة سواء أكانت سياسية او اجتماعية او عملية لا يمكن ان تكون وليدة لحظة اندلاعها بل هنالك دوما عوامل مسبقة تعمل على تحضيرها ، ويتبع عادة انفجار الثورة فترة استقرار قد يطول أمدها أحيانا .

والنظرية النسبية التي أوردها اينشتين عام ١٩٠٥ هي أهم الثورات العلمية التي عرفتها البشرية ، فقد قلبت هذه الثورة المفاهيم العلمية القديمة واستبدلتها بمفاهيم جديدة كانت بمثابة الاصلاحات العلمية التي كان لا بد منها لتصحيح المعتقدات السائدة .

وضعت تجارب ميكلسون العلماء في حيرة من أمرهم ، فهم لو سلموا بمبادىء نيوتن لوجب عندها ان يشترك الوسط الاثيري كليا مع حركة المادة ، بينما كانت هنالك ظواهر طبيعية ثابتة تفرض بشكل قاطع وجوب بقاء الوسط الاثيري ساكنا .

ولكن هل تعني نتائج ميكلسون ان مفاهيم نيوتن الاساسية كانت مفاهيم خاطئة أو تقريبية ؟ وهل هنالك عالم واحد يجرؤ على اعلان

ذلك ؟ حار العلماء في أمرهم وحاولوا التستر على هذه المتناقضات بتعليلات واهية •

فحاول العالم لورنتز وضع معادلات رياضية غايتها تعليل نتائج تجارب ميكلسون • ورفض العلماء هذه المعادلات لكونها وضعت خصيصا بغية تعليل ظاهرة فيزيائية معينة • وعاد لورنتز ونشر عام ١٩٠٤ فرضية البنية الكهربائية للمادة ونجح بواسطتها في تعليل ظاهرة تقلص الاطوال بينما بقيت ظاهرة تحول الزمن دون تعليل •

ولم تف فرضية لورنتز بالغرض المطلوب وظن العلماء بأن الطبيعة تتآمر عليهم •

وفي هذه الحقبة بالذات وفي الثلاثين من شهر حزيران عام ١٩٠٥ نشر العالم الالماني البرت اينشتين (Albert Einstein) أبحاثا برهن بواسطتها بأن الطبيعة لا تتآمر على أحد وما التآمر الذي ظنه العلماء الا ناموسا طبيعيا •

وجد اينشتين نفسه مضطرا الى العودة لمناقشة المعتقدات العلمية والفلسفية القديمة تلك المعتقدات التي بنى عليها العلم الكلاسيكي واقترح ادخال تعديلات جذرية عليها ، ونادى بفرضيات جديدة جريئة استمدها من التجارب الطبيعية ونجح بواسطتها في تعليل النتائج التجريبية نجاحا منقطع النظير • وأثمرت فرضياته في ايجاد الحلول التالية :

١ ــ ايضاح المعتقدات العلمية الاساسية •

٢ ــ تعليل نتائج تجربة ميكلسون •

٣ ــ تعليل عدد كبير من الظواهر الطبيعية التي كانت النظريات القديمة قد فشلت في تعليلها •

٤ ــ استنتاج قانون جديد في الجاذبية العالمية ، أفضل وأعم بكثير من قانون نيوتن ، اذ سمح هذا القانون بتنبؤات علمية هامة أمكن تحقيقها فيما بعد •

د ــ تعليل حركة الكوكب عطارد (Mercure) تلك الظــاهرة التي عجزت نظريات نيوتن في تعليلها ، وسوف نأتي في الفصول القادمة على شرح مسهب لنظرية النسبية بقدر ما يسمح به لنا اطار هذا الكتاب .

لمحة تاريخية عن حياة البرت اينشتين (Einstein)

ولد البرت اينشتين في ١٤ آذار عام ١٨٧٩ في مدينة اولــم (Ulm) من أعمال ورتمبرغ في المانيا ورحلت عائلته الى ميونيخ بعد عام واحد من ولادته .

نشأ البرت في بيئة نصف ريفية كان لها الاثر الفعال على نمو شخصيته ولم يكن طفلا ذكيا اذ استغرق تعليمه النطق وقتا طويلا . وكان منذ طفولته يحب العزلة . وكان أبغض الاشياء الى نفسه مشاركة رفاقه في ألعابهم العسكرية . وقد اهداه والده ، وهو ما يزال حدثا بوصلة صغيرة كان لها الاثر الفعال في نمو ملكته العلمية . وعندما كبر اشتد ميله الى العلوم الطبيعية فكان يقبل على كتب التبسيط العلمي للجمهور بنهم بالغ . وتفوق اينشتين على كافة زملائه في العلوم الرياضية .

ورحلت العائلة الى مدينة ميلانو الايطالية بعد أن أصيب ربها بنكبة مالية وبقي اينشتين فيميونيخ ليكمل دراسته الثانوية . واجبر عــلى ترك المدرسة لاسباب مسلكية قبل أن يحصل على شهادة الدراســة الثانوية مما جعل دخوله للجامعة امرا مستحيلا ، وحاول دخول مدرسة البوليتكنيك الاتحادية في زوريخ ورسب في امتحان الدخول فالتحق بمدرسة آرو (Aarau) وحصل على دبلومها وعندها دخل الى مدرســة البوليتكنيك دون امتحان .

وأتم اينشتين دراسته وأخذ بعدها يبحث عن عمل فطلب تعيينــه

مساعدا لأحد اساتذة البوليتكنيك ، ولكن أحدا منهم لم يرتضه مساعدا له • وحاول العمل مدرسا في احدى المدارس الثانوية ولكنه لم يجب الى طلبه •

واكتسب الجنسية السويسرية عام ١٩٠١ وظن انه باكتسابه اياهـا ستفتح أبواب العمل في وجهه على مصراعيها . ولكن جهوده في البحث عن عمل ذهبت هباء • وقدمه صديق له الى هالر مدير مكتب تسجيل براءات الاختراع في برن (Berne) وأعجب المدير بالشاب ووجد لـه عملا في مكتبه •

وفي الثلاثين من شهر حزيران عام ١٩٠٥ بعث اينشتين الى احدى المجلات العلمية ببحث احدث ثورة في تاريخ العلم وضع فيه نظريتـه النسبية الخاصة •

واسترعت النشرة اهتمام علماء الفيزياء في جامعات سويسرا كلها ، وطلبوا تعيينه استاذا في جامعة زوريخ فأسند لـه عام ١٩٠٩ كرسي الفيزياء النظرية في جامعة زوريخ • وفي عام ١٩١٠ شغر كرسي الفيزياء النظرية في جامعة براغ الالمانية فطلبت ادارة الجامعة اينشتين ، ليشغله وأغرته بالراتب فترك زوريخ وتوجه الى براغ . وفي عام ١٩١٢ عرض عليه كرسي الفيزياء في مدرسة البوليتكنيك بزوريخ فترك براغ وقفل عائدا الى زوريخ •

وطلع اينشتين عام ١٩١٣ على العالم بعدد ضخم من الافكار الجديدة جعل العالم يقف امامها مشدوها ، غير أن اينشتين نفسه لم يكن راضيا عن هذه الافكار ولم يفكر الا بسد الثغرات التي حوتها وكان حتى ذلك الحين يحاول حل مشاكله بأبسط الطرق الرياضية •

ولكنه وهو في براغ أحس أن تعميم نظريته يتطلب منه اصطناع مناهج رياضية جديدة اكثر تعقيدا من تلك التي كان يمارسها ، واقترح

عليه عندها زميله بيك (Pick) اللجوء الى النظريات الرياضية الجديدة وبمجرد عودته الى زوريخ انكب على دراسة هذه المناهج . وفي عـام ١٩١٣ عرض عليه العالم الالماني ماكس بلانك (Max Plank) أن يكون رئيسا لمؤسسة علمية في مدينة برلين وأن يصبح عضوا في المجمع الملكي للعلوم البروسية . وقبل اينشتين العرض وغادر زوريخ في أواخر عام ١٩١٣ وانضم الى المجمع الملكي وكان سنه لا يناهز الرابعة والثلاثين فكان الشاب الوحيد بين زملائه الشيوخ ، ونجح عام ١٩١٦ في نشـر النظرية النسبية العامة واستنتج منها قانونا خاصا في الجاذبية العامـة يختلف اختلافا تاما عن نظرية نيوتن . ونجح اينشتين نجاحا منقطـع النظير حيث أخفق نيوتن وجعل الناس جميعا يهتمون به لا العلمـاء وحدهم ، وانبرى له خصوم كثيرون .

وكانت لاينشتين آراء سياسية خاصة فاصبحت حياته في برلين أمرا لا يطاق . وأخذت الدسائس والمؤامرات تحاك حوله من كل حـدب وصوب ، وظهرت في المجـلات والصحف مقالات المغرضين يشجبون نظرياته ويؤكدون انها ان كانت لهـا بعض القيمة في ميدان العـلوم الفيزيائية فهي خاطئة من الوجهة الفلسفية .

وفي عام ١٩١٩ تمكن العلماء الانكليز من التحقق من صدق نبوءة اينشتين عن انحراف الضوء عند مروره بالمجال الجاذب ، وأحدث ذلك دويا هائلا في الاوساط العلمية العالمية وأخذ الناس يتساءلون عن الرجل ومن عساه أن يكون فالكل يريد لقاءه والاجتماع به . وانهالت عليـه الدعوات من جميع بلاد العالم لزيارتها والقاء محاضرات فيها .

فتوجه الى ليدي (Leyde) في هولندا وعين استاذا في جامعتها . وفي عام ١٩٢١ توجه الى الولايات المتحدة الاميريكية فاستقبلته مدينـة نيويورك استقبال الفاتحين ومنحته جامعة برستون دكتوراه الشرف في ٩ أيار من عام ١٩٢١ .

وفي طريق عودته الى المانيا من الولايات المتحدة دعي لزيارة لندن ، وكان استقباله فاترا ، وعند وصوله وضع اكليلا من الزهر على ضريح العالم نيوتن • وساهمت رحلات اينشتين في تحسين العلاقات بين العلماء الالمان والانكليز والامريكان ، واقترح العالم الفرنسي بول لانجفين (Langevin) دعوة اينشتين لزيارة باريس وقبل اينشتين الدعوة وحضر الى باريس في اواخر شهر آذار عام ١٩٢٢ والقى محاضراته في جامعة السوربون •

وبعد هذه الاسفار المشحونة بالتوتر السياسي رأى اينشتين أن يطوف ببلاد الشرق الاقصى ، فوصل شنغهاي في ١٥ تشرين الثاني من عام ١٩٢٢ واليابان في العشرين منه • وفي طريق عودته الى اوربا مر بفلسطين وحل في دار الحاكم البريطاني . وهناك أنحى باللائمة على اليهود لجحودهم ونكرانهم وحثهم على التفاهم مع العرب • ولم يرحب اليهود بمقدمه ونظر اليه المتطرفون منهم شذرا وغادر فلسطين سنة ١٩٢٣ متوجها الى اسبانيا حيث استقبله الملك الفونس الثالث عشر وفي تموز من ذلك العام ذهب الى السويد لاستلام جائزة نوبل والقى هناك محاضرة حضرها ملك السويد ولفيف من العلماء الاسكندينافيين •

وعاد اينشتين الى برلين الا انه لم يمكث فيها طويلا بل ذهب لزيارة امريكا اللاتينية وعاد بعدها الى بلجيكا ، وفي أثناء غيابه كان هتلر قد استلم الحكم في المانيا وبدأ حملته التطهيرية ضد اليهود ، فخاف اينشتين ولم يعد الى برلين خاصة بعد أن سمع بمصادرة املاكه ، فغادر بلجيكا نهائيا الى الولايات المتحدة وعين استاذا في جامعة برستون عام ١٩٣٣ •

ومكث هناك واكتسب الجنسية الامريكية عام ١٩٤٠ ووافته المنية في الثامن عشر من شهر نيسان عام ١٩٥٥ أي بعد نصف قرن من نشره النظرية النسبية الخاصة •

القسم الاول

النظرية النسبية الخاصة

الفصل الأول

فرضيات اينشتين

تمتاز فرضيات اينشتين عن سواها من الفرضيات العلمية بكونها بنيت على وقائع تجريبية ثابتة .

لم يسلك اينشتين طريق العباقرة الذين سبقوه وظنوا انهم باستطاعتهم بناء العلم على فرضيات استقرائية لم تحققها أية تجربة واقعية .

بنى نيوتن فرضياته على ظاهرة العطالة . ولم يقم نيوتن بأية تجربة أيدت الظاهرة المذكورة ، فقد سبقه غاليله الى القول بقانون العطالة وظن انه استنتجه من التجارب الواقعية الا انه اخطأ في التدقيق في تجاربه كما اخطأ في اعتبارات هندسية . كانت الكرة التي تتدحرج على المنضدة الافقية الملساء تتحرك بنظره حركة مستقيمة منتظمة فيما لو اهملت مقاومة الهواء والاحتكاك ؛ واهمل غاليله تكور الارض وحركتها .

وتلافى نيوتن اخطاء غاليله وقال بعدم امكانية تحقيق قانون العطالة الا في الجمل المقارنة الساكنة اطلاقا وانتهى منها الى فكرتي المكان المطلق والزمان المطلق ؛ ولم يتمكن نيوتن من تحديد الجملة المطلقة

تحديدا علميا منطقيا وأوقعته النظرية النسبية الكلاسيكية التي نتجت عن دراساته ، في دائرة مفرغة .

لقد اعتمدت النظرية النسبية على تحويلات غاليليه التي اشتقت بدورها من قانون العطالة وفكرة المكان المطلق والزمن المطلق . واذا صحت النظرية النسبية استحال معها معرفة فيما اذا كانت جملة مقارنة معينة في حالة سكون أو حركة . واذا ادعى البعض بأن الجملة تتحرك حركة انسحابية منتظمة وجد من يعارضه القول ويدعي بثبات الجملة : اذ تبقى القوانين الفيزيائية محققة في هذه الجملة تماما كما هو الحال في الجملة المطلقة الساكنة .

وقوضت النظرية النسبية الكلاسيكية دعائم المكان المطلق الذي وضع خصيصا بغية استنتاجها . وما حل بفكرة المكان المطلق حل بدوره أيضا بفكرة الوسط الاثيري الساكن : فقد اقترح الوسط الاثيري بغية استنتاج النظرية النسبية في علمي الضوء والكهرباء . ولما ثبتت هذه النظرية وحققتها التجارب الدقيقة أصبح وجود الوسط الاثيري كعدم وجوده .

تأمل اينشتين طويلا بهذه المناقضات فدفعته عبقريته الفذة الى اكتشاف الخلل واستئصاله من جذوره . وعاد الى تجربة ميكلسون وغيرها من التجارب الحديثة تلك التجارب التي وضعت أقرانه في حيرة من أمرهم حتى أوشكوا على الكفر بالعلم وأسلموا أمرهم للقوى الطبيعية الخارقة التي ظنوها تتآمر عليهم .

وصرخ اينشتين : « كلا ياسادة : الطبيعة لا تتآمر علينا ولكننا نحن معشر العلماء قد أسأنا فهمها . لقد افهمتنا الطبيعة بالتجارب الدقيقة القاطعة استحالة تحديد حركتنا بدلالة الاثير ، فلماذا لا نعتمد هذه الظاهرة مبدأ اساسيا لنبني عليه مفاهيمنا العلمية ؟ ودلتنا ايضا تجارب

ميكلسون التي لا ينالها شك ان سرعة الامواج الضوئية تبقى ثابتة ولا تتأثر بحركة المنبع الضوئي الباعث لها فلماذا لا نعتبر هذه الظاهــرة الجديدة فرضا أساسيا لبناء مفاهيمنا ؟ فاسمحوا لي اذاً أن أطرح جانبا كافة المفاهيم والفرضيات العلمية الموروثة وأن اكتفي بالفرضيتين التاليتين اللتين ساقتنا الطبيعة صاغرين الى الاخذ بهما .

الفرضية الاولى :

« الوسط الاثيري فرض غير ضروري ومن العبث محاولـة تحديد حركة الجملة المادية بدلالة وسط لا مبرر لوجوده » .

الفرضية الثانية :

« تنتشر الموجة الضوئية بسرعة ثابتة في الفضاء ولا تتأثر سرعتها بحركة المنبع الباعث لها » .

وأثارت فرضيتا اينشتين ضجة عارمة في الاوساط العلمية وانبرى لمعارضتهما فطاحل من اتباع المدرسة الكلاسيكية ، وادعى بعضهم بوجود تناقض واضح بين الفرضيتين وأيدوا ادعاءهم بالمثال التالي :

تخيل محطة للقطارات يقف فيها قطاران على خطـين متوازيين في لحظة معينة ولتكن ز = صفر يقذف القطار الاول قنبلة في اتجاه الخط بسرعة سر = ٣٥٠ م/ثا وفي هذه اللحظة بالذات يطلق القطار الثاني صفارته وتنتشر الامواج الصوتية في الهواء الساكن بسرعة ٣٥٠ م/ثا أيضـا .

فاذا وقف شخص بين الخطين بعيدا عن القطارين (شكل ٤١) سمع صوت الصفير لحظة مرور القذيفة فوقه .

فاذا تحرك القطاران في جهة واحـدة بسرعة (سر١) اصغر مـن

٣٥٠ م/ثا ، وطبقنا على جملة الحركتين العلاقـــة الكلاسيكية لتركيب السرع نتج ما يلي :





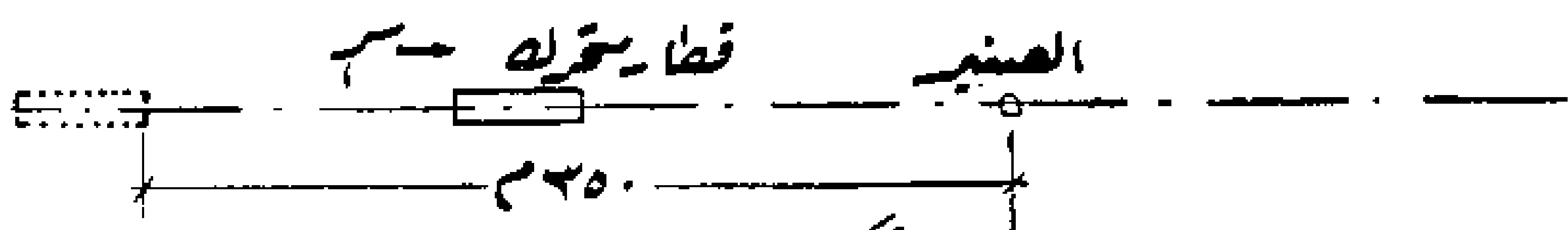
شكل ٤١

أصبحت سرعة القنبلة بدلالة الشخص الواقف على الخط (سر + سر$_1$) ولا تؤثر حركة المنبع على سرعة الموجة الصوتية لان سرعة الموجة الصوتية لا تعتمد الا على نوعية الوسط الذي تنتشر فيه هذه الموجة .

وبعد ثانية واحدة من قذف القنبلة واطلاق الصفير من القطارين المتحركين تصل القنبلة الى بعد (٣٥٠ + سر$_1$) م عن المكان الـــذي قذفت منه ويكون بعدها عن القطار المتحرك ٣٥٠ م فقط .

بينما يصل الصفير بعد ثانية من اطلاقه الى بعد ٣٥٠ م عن المكان الذي اطلق منه ويكون بعده عن القطار المتحرك في هذه الحالة (٣٥٠ — سر$_1$) م (شكل ٤٢) .





شكل ٤٢

فاذا اعتبرنا رصيف المحطة جملة مقارنة ثابتة وكلا من القطارين جملة مقارنة متحركة بدلالته بسرعة $سر_1$ ، وفرضنا مبدأي الجملتين (المتحركة والثابتة) منطبقين في اللحظة ز = صفر أمكن عندها تمثيل حركة الصوت بدلالة الجملة الساكنة (رصيف المحطة) بالعلاقة :

$$س = سر\ ز$$

وتمثل حركته بدلالة الجملة المتحركة (القطار المتحرك) :

$$س_1 = (سر - سر_1)\ ز$$

فاذا استطاع راكبو القطار قياس المقادير ($س_1$) و (سر) و (ز) أمكنهم تحديد سرعة القطار ($سر_1$) بتجارب صوتية تجرى على هذا القطار • غير ان الحركة التي تعينها هذه التجربة ليست حركة حقيقية بل هي حركة نسبية لان ما تعينه التجربة لا يعدو كونه حركة القطار بالنسبة للهواء فلو بقي القطار ساكنا وتحرك الهواء بسرعة ($- سر_1$) لحصلنا على نتائج مماثلة للنتائج السابقة •

واذا استبدلنا صفارة القطار بمصباح ضوئي قوي يرسل أمواجه في اللحظة ز = صفر وقبلنا بفرض اينشتين الثاني القائل باستقلال سرعة انتشار الموجة الضوئية عن حركة المنبع الباعث لها حصلنا عندها على نتائج مماثلة لحالة الموجة الصوتية • وكانت العلاقة الممثلة لحركة الموجة الضوئية بدلالة جملة القطار هي :

$$س_1 = (ث - سر_1)\ ز$$

بفرض (ث) سرعة انتشار الموجة الضوئية و ($سر_1$) سرعة القطار و (ز) فترة الحركة •

فاذا علمنا كلا من ($س_1$) و (ث) و (ز) أمكن عندها حساب سرعة القطار ($سر_1$) بدلالة الاثير الساكن ، وهذا ما يناقض الفرضية الاولى •

« فالفرضية الثانية لاينشتين لا تسمح بوجود الفرضية الاولى فاما الفرضية الاولى أو الفرضية الثانية : ومن الخطأ القول بالفرضيتين معا » .

وهز اينشتين من هذه الاعتراضات واعتبرها نتيجة لرواسب الماضي . فهو عندما وضع فرضيته طرح جانبا كل ما له علاقة بالمفاهيم القديمة وخاصة ما يتعلق منها بتركيب الحركات ومفهومي المكان المطلق والزمان المطلق .

لذلك من السابق لاوانه الحكم على صحة أو خطأ الفرضيتين قبل استعراض ما آلت اليه مفاهيم تركيب الحركات والمكان والزمان نتيجة للفرضيات الجديدة .

آلت المفاهيم الكلاسيكية المتعلقة بالمكان المطلق والزمان المطلق الى تحويلات غاليله وطبقت هذه التحويلات على الجمل العطالية بغية جعل القوانين الفيزيائية متماثلة في مختلف هذه الجمل . وكانت ساعة واحدة كافية لتقدير الفترات الزمنية في مختلف الجمل العطالية وذلك لان سير الزمن مستقل عن حركة الجملة و ز ... ن مهما كانت الحركة الانسحابية المنتظمة للجملة .

كذلك كانت الاشكال الهندسية تحافظ على أشكالها في كافة الجمل المتحركة : فالاطوال والزوايا هي مقادير فيزيائية اساسية لا تتأثر بحركة الجملة وترغمنا هذه النتائج بالقبول بلحظية انتشار التأثير في الفضاء . ويعني ذلك انه لو وقعت حادثة (آ) في بقعة من الكون واشارت الساعة الموضوعة بجوار مكان وقوعها الى لحظة زمنية معينة وجب عندها أن تشير الساعات المماثلة والموضوعة في مختلف نقط الكون الى ذات اللحظة عند وقوع الحادثة (آ) . أما كيف يمكن أن تتحقق من هذه الظاهرة فهذا أمر لا يتم الا اذا تصورنا قضبانا صلبة كاملة تنقل اشارة وقوع الحادثة (آ) الى مختلف بقع الكون لانه من خواص الجسم

الصلب الكامل نقل التأثيرات لحظيا الى أماكن بعيدة جدا فبواسطة هذه القضبان وبواسطتها فقط يمكن القبول بامكانية التحقق من توافق الساعات المختلفة •

كذلك اذا وقعت حادثة (ب) في مكان وقوع الحادثة (آ) وأشارت الساعة الموضوعة في المكان الى فارق زمني معين بين الحادثتين وجب عندها ان تشير كافة ساعات الكون الى فترة زمنية مساوية لها • واذا وقعت الحادثة (آ) قبل االحادثة (ب) حافظ هذا التتابع على نوعيته وقيمته في مختلف الساعات •

والحادثتان المتواقتتان في جملة مقارنة معينة تكونان متواقتتين في كافة الجمل ولا يمكن التحقق من هذه الخاصة الا متى قبلنا بالانتشار اللحظي للتأثير •

اطلع اينشتين على هذه النتائج وتأمل فيها فوجدها مبنية على أسس واهية لا يمكنه اقرارها كعالم فيزيائي لا يعتبر الحقيقة العلمية الا اذا أيدتها التجارب •

والتعريف العلمي لا يصبح حقيقة الا اذا تمكن العالم الفيزيائي من تحقيقه في مختبره ؛ والتأثير اللحظي عن بعد تعريف ميتافيزيكي بعيد عن المنال التجريبي، والجسم الصلب الكامل القادر على نقل هذا التأثير جسم وهمي لا يمكن الاقرار بوجوده خاصة بعد أن وضحت البنية الذرية للمادة وخاصتها المتقطعة • واذا رغبنا في التحقق من توافق الساعات المختلفة وجب قبل كل شيء ايراد تعريف للتواقت يمكن تحقيقه تجريبيا بوسائل فيزيائية حقيقية •

وقال اينشتين بان أسرع وأسهل طريقة لنقل التأثير الى المناطق البعيدة هي الاشارات الضوئية أو الكهرطيسية ؛ فلم يصل العلماء الى ايجاد وسيلة أسرع وأضمن من الاشارة الضوئية ينقلون بواسطتها خبر

وقوع حادثة من مكان وقوعها الى الاماكن الاخرى من الكون . وخلص من فكرته هذه الى مفهوم جديد للتوافت بعث به في الثلاثين من حزيران عام ١٩٠٥ الى مجلة العلوم الفيزيائية وكان عنوان المقال « مناقشات في توافت حادثتين » .

وسنقوم في الفصل التالي بشرح تفصيلي لفكرة التوافت كما اوردها العالم اينشتين في نشرته المذكورة .

* * *

الفصل الثاني

التواقت المطلق والتواقت النسبي

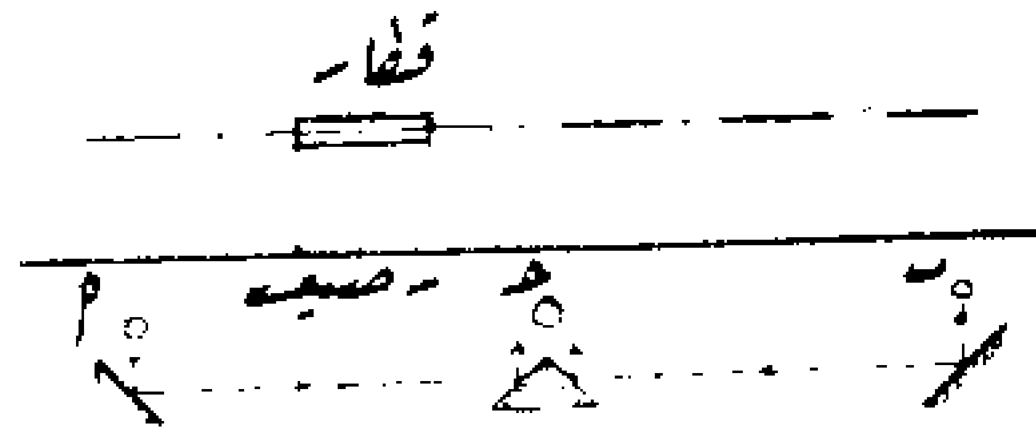
بدأ اينشتين مقاله بنقد فكرة التواقت المطلق لحادثتين في مختلف الجمل العطالية المتحركة وأيد نظريته بالمثال التالي :

تتخيل محطة للقطارات طويلة جدا حدثت فيها صاعقة ، وسقطت ضربتا برق في « نفس الوقت » في مكانين (ا) و (ب) من رصيف المحطة . وهنا يسأل اينشتين : « ماذا نقصد يا ترى بكلمة نفس الوقت » ويجيب على السؤال فيقول : قد تترددون في الاجابة فترة من الوقت ثم تقولون بعد لأي : « مفهوم الظاهرة واضح بحد ذاته وليس بحاجة الى تعليلات وايضاحات اضافية واذا رغبنا باثبات تعريف التواقت هذا وجب علينا التأكد تجريبيا من أن ضربة البرق في (ا) والوميض الضوئي الذي يرافقها يحدثان في لحظة حدوث ضربة البرق في (ب) مع الوميض المرافق لها » .

وعندها يقترح اينشتين اتباع الطريقة القياسية التالية لاثبات التعريف :

تتصور شخصا يجلس في (حـ) الواقعة في منتصف القطعة المستقيمة (ا ب) (شكل ٤٣) . ويجهز هذا الشخص بمجموعة من المرايا تمكنه من رؤية كلاً من (ا) و (ب) في لحظة واحدة دون تحريك رأسه .

فاذا سجلت المرآتان اضائتي ضربتي البرق في ذات اللحظة بواسطة الانعكاس يمكننا عندها اعتبار الاضاءتين كأنهما حدثتا في نفس الوقت .



شكل ٤٣

ووجد اينشتين في التعريف أعلاه نقطة ضعف أساسية وقال :

لا يحق لنا كعلماء فيزيائيين القبول بالطريقة التجريبية المقترحة الا متى فرضنا بأن الضوء ينتشر على الطريق (ا حـ) بسرعة تساوي سرعة انتشاره على الطريق (ب حـ) • ولا نستطيع التأكد من الفرض الاخير الا اذا وجدنا الاجهزة الضرورية لقيـاس الزمن وأعني بها الساعات • وينبغي أن تضيع الموجة الضوئية الذاهبة من (ا) الى (حـ) زمنا يساوي الزمن الذي تضيعه الموجـة الضوئية الذاهبة من (ب) الى (حـ) • ولا يمكن التحقق من ذلك الا اذا كانت الساعتـان الموضوعتان على مسافات بعيدة متواقتة فنحن اذا ندور في دائرة مفرغة فقد بدأنا بتعريف التواقت وانتهينا الى أن تعريف التواقت لا يتم الا بساعات متواقتة •

وهنا يعود اينشتين ليقول : قد يصر بعضكم على التمسك بالتعريف الاول لكونه لا يتطرق لا من قريب ولا من بعيد لطبيعة الضوء ولا نطلب من التعريف سوى أن يمدنا بطريقـة تجريبية تفي بالغرض • ويتـم التواقت اذا رأى المشاهد (حـ) في وقت واحد الومضتين الضوئيتين الواردتين من (ا) و (ب) فاذا تطلب هذا التعريف وجوب اعتبار سرعة واحدة للضوء في انتشاره من (ا) الى (حـ) ومن (ب) الى (حـ) فليكن كذلك فنحن لا نعتبر هذا الفرض نظرية بل مجرد تخمين وجدناه ضروريا لتعريف التواقت وتحقيقه تجريبيا •

وخلص اينشتين من تعريف التواقت الى ابتكار طريقة تجريبية تمكنه من ضبط ساعات متماثلة الصنع موضوعة في أماكن مختلفة من جملة مقارنة واحدة •

نجمع عددا من الساعات المتماثلة الصنع في مكان معين من رصيف المحطة ونضبط عقاربها على تأشيرة واحدة ثم نفرقها ونضع كل واحدة منها في موضع خاص من الرصيف • وتمكننا الطريقة الضوئية المشروحة أعلاه من التحقق من انتظام سير الساعات وتواقتها ، وذلك بواسطة ومضات ضوئية ترسل من الامكنة الموضوعة فيها هذه الساعات •

فاذا وضعنا في نقطتين (ا) و (ب) من الجملة المقارنة ساعتين متماثلتين تحققنا من تواقتهما بالطريقة الضوئية وحدثت في مكاني الساعتين ظاهرتان طبيعيتان قابلتان للمشاهدة المباشرة وبينت هذه المشاهدة أن عقارب الساعتين تشير الى أوضاع متماثلة قلنا عندها بتواقت الظاهرتين الطبيعيتين •

وانتقل اينشتين بعد ذلك الى مناقشة مفهوم التواقت وتأثير حركة الجملة عليه قال : اذا أقبل قطار سريع على شريط يوازي الرصيف وكان يجلس فوق احدى عرباته شخص يصطحب مجموعة من المرايا ووصل الشخص المتحرك الى محاذاة الشخص الجالس على رصيف المحطة في ذات اللحظة ، متقدرة من الرصيف ، التي يحدث فيها البرق في (ا) و (ب) • فهل تبدو ضربتا البرق في ذات الوقت للشخص الجالس على القطار ؟ والجواب على ذلك « لا » لن يبدو ذلك ••• لانه اذا افترضنا أن القطار كان مبتعدا عن ضربة البرق عند (ب) ومقتربا من ضربة البرق عند (ا) فمن الواضح ان ضربة (ب) سوف تسجل بالانعكاس على المرايا بعد ضربة (ا) بجزء من الثانية • ولكيلا يخامرنا الشك في هذه النتيجة لنفرض أن القطار يسير بسرعة الضوء ، فان المرايا في هذه الحالة لا تستطيع أن تسجل اضاءة (ب) اطلاقا لانها لن تستطيع ادراك القطار

المتحرك بذات السرعة ، والشخص الجالس فوق القطار يدرك ويؤكد وقوع ضربة برق واحدة في (ا) فقط • ومن هنا كانت ضربتا البرق اللتان تبدوان كأنهما تحدثان (في ذات الوقت) بالنسبة للشخص على الرصيف لا تبدوان كذلك بالنسبة للشخص الجالس فوق القطار •

والحادثتان المتوافقتان في جملة الرصيف لايمكن أن تكونا متوافقتين في جملة القطار المتحرك بدلالة هذا الرصيف ، والتوافق نسبي وليس مطلقـــا •

ويمكننا اذا عرفنا التوافق داخل جملة القطار بطريقة مماثلة لتعريفنا اياه في جملة الرصيف ، أن نقوم بالمناقشة العكسية التالية :

اذا ضرب البرق القطار في النقطتين (اَ) و (بَ) في وقت واحد ، مقدرا في جملة القطار ، وتحققنا من ذلك بواسطة جملة مرايا توضع مع الشخص الجالس في القطار في النقطة (حـَ) منتصف القطعة (اَ بَ) ، ثم مر الشخص الجالس في(حـَ) بمحاذاة شخص آخر يجلس على الرصيف في (حـ) وذلك لحظة (مقدرة في القطار) سقوط البرق في (اَ) و (بَ) • شاهد عندها (حـَ) الومضة الضوئية الواردة مـــن (بَ) « القطار يتجه من (ب) الى (ا) » قبـــل الومضة الضوئية الواردة من (اَ) • والحادثتان المتوافقتان في جملـــة القطار المتحرك لا تكونا متوافقتين في جملة الرصيف •

وهذا التناقض الظاهر في تجربة ضربتي البرق يترجم لنـــا أصعب وأعمق فكرة في فلسفة اينشتين وهي فكرة نسبية الزمن •

وبموجب هذه الفكرة لا يستطيع الانسان أن يفترض أن ادراكه الذاتي لما يقصده هو من كلمة « الآن » ينطبق على جميع أجزاء الكون فلكل جملة مقارنة متماسكة زمنها الخاص وتقديراتها الزمنية الخاصة ، ولا معنى لتحديد زمن حادثة ما لم نعين الجملة المقارنة التي ترد اليها هذه الحادثة ، ولن تصلح ساعة واحدة لقياس الزمن في مختلف أرجاء

الكون ولكل جملة مقارنة ساعتها الخاصة ويعتمد انسياب الزمن في هذه الساعة على الحالة الحركية لهذه الجملة •

ويوضح لنا المثال التالي فكرة نسبية التواقت : تتخيل بحرا هادئا تسير فوقه قافلة من السفن تقطرها سفينة (ا) ، والليلة مظلمة يخيم فيها ضباب كثيف يجعل الرؤية متعـذرة • ولنفرض أن ركاب القافلة رغبوا في مقارنة ساعاتهم مع ساعة السفينة (ا) • في الساعة الثانية عشرة تطلق السفينة (ا) طلقا ناريا ، وتضبط الساعات في القافلة على الثانية عشرة لدى سماعها صوت الطلقة ، فهل تكون ساعات القافلة متواقتة ؟

اذا كانت القافلة ساكنة لا تتحرك وجمعنا الساعات كلها في مكان واحد وجدناها تختلف عن بعضها اختلافا ضئيلا ، وهذا الاختلاف مرده عدم لحظية انتشار الموجة الصوتية في الهواء ، ويمكن تصحيح هذا الخطأ اذا علمنا المسافة بين كل سفينة والقاطرة (ا) وعلمنا أيضا سرعة انتشار الصوت •

أما لو كانت القافلة متحركة وجب عندها اضافة عامل تصحيح آخر لا يمكننا معرفته الا متى علمنا سرعة القافلة بدلالة هواء الجو ، واذا كانت هذه السرعة مجهولة استحال عندها ضبط ساعات القافلة ضبطا مطلقا بواسطة الاشارة الصوتية •

ويقترح عندها البعض استبدال الاشارة الصوتية باشارة لاسلكية (اشارة راديو) ولما كانت سرعة انتقال الاشارة اللاسلكية كبيرة جـدا (٣٠٠٠٠٠ كم / ثا) كان عنده الخطأ المرتكب في ضبط ساعات القافلة ضئيلا للغاية . انما من الوجهة المبدئية هنالك خطأ ولا يمكن تفاديه الا اذا علمنا سرعة القافلة بدلالة الاثير •

ويستحيل اجراء مقارنة منتقة للساعات في جملة متماسكة متحركة الا اذا علمنا حركة هذه الجملة بدلالـة الاثير ، فالتواقت المطلق بـين

ساعات الجملة المتحركة شيء مستحيل ولا يمكن تعريفه حتى نظريا الا اذا قبلنا بوجود الوسط الاثيري الساكن •

وطرح اينشتين الوسط الاثيري جانبا وقال بانتشار الضوء (الاشارة اللاسلكية) بسرعة ثابتة في مختلف الجمل مهما كانت حالتها الحركية وعليه يمكن ضبط ساعات القافلة مهما كانت حركتها وذلك بواسطة الاشارة اللاسلكية شرط ادخال عامل مصحح ناتج عن المسافات الثابتة الفاصلة بين ساعة القاطرة (ا) وساعات سفن القافلة •

وساعات القافلة هي كساعات المحطة في سكون نسبي ويمكن ضبطها بسهولة •

فاذا تخيلنا الآن قافلة سفن ثانية تقطرها السفينة (اَ) وتفصل بين سفنها مسافات مساوية للمسافات الفاصلة بين سفن القافلة الاولى . ولنفرض أننا واقتنا ساعات القافلة الثانية على ساعات السفينة (اَ) بواسطة الاشارة اللاسلكية ، ولنفرض أيضا أن الحالة الحركية للقافلة الثانية لا تماثل الحالة الحركية للقافلة الاولى ؛ وبمعنى أوضح القافلتان في حالة حركة نسبية ، ووصلت القافلة الثانية الى محاذاة القافلة الاولى بشكل يتسنى معه لركاب القافلتين مقارنة ساعاتهم ، فاذا وجد راكب القاطرة (ا) ساعته متوافقة مع راكب القاطرة (اَ) وجب عندها أن يلاحظ باقي ركاب القافلة عدم وجود توافق بين ساعاتهم • ويعود هذا التباين الى اختلاف حركتي القافلتين ويزداد مع سرعتهما النسبية • فالحوادث المتوافقة (ضبط الساعات) في جملة القافلة الاولى لا يمكن أن تكون متوافقة في جملة القافلة الثانية •

وفي حالة استعمال الاشارة الصوتية تمتلك جملة واحدة فقط الزمن الصحيح وهي الجملة الساكنة بدلالة الهواء • أما في حالة استعمال الاشارة اللاسلكية والضوئية فانه يستحيل عندها تفضيل زمن احدى

الجمل عن الجمل الاخرى لان الحركة بدلالة الاثير الضوئي مفهوم لا يقره الواقع الفيزيائي .

فاذا استعملت الاشارة الضوئية لضبط ساعات الجملة كان عندها لكل جملة زمن خاص بها تشير اليه ساعة من الساعات المتواقتة في هذه الجملة . ولا يمكننا تفضيل زمن جملة على زمن جملة أخرى اذ يمكن لكل جملة أن تدعي بصحة قراءاتها الزمنية لان كلا من هذه الجمل يمكن أن تدعي بسكونها المطلق .

واذا حق لشخصين المجاهرة بادعاء مماثل وكان لا معنى لهذا الادعاء الا بالنسبة لاحدهما فقط ، فقد عندها هذا الادعاء معناه . لذلك يمكن أن نقول بأن التواقت المطلق غير موجود .

فلكل جملة اذاً زمن خاص بها تشير اليه الساعات الموضوعة في أماكن متفرقة من هذه الجملة ويصار الى ضبط هذه الساعات بالطريقة الضوئية التي اقترحها اينشتين .

ولا شيء يحتم تواقت ساعات جملة عطالية مع ساعات جملة عطالية أخرى تتحرك بدلالتها .

* * *

الفصل الثالث

نسبيـة الاطـوال

تقودنا فكرة نسبية التواقت الى مفهوم نسبية الاطوال • يقول اينشتين : « الطول المقاس ليس مقدارا أساسيا بحد ذاته ، وانما هو مقدار نسبي يتحول مع جملة المقارنة المردود اليها وتتبع قيمته الحالة الحركية لهذه الجملة » •

يمكننا ايضاح فكرة اينشتين بالمثال التالي :

تتخيل سمكة في دورق ماء ونفرضها ساكنة في هذا الدورق ، فاذا رغبنا في قياس طول السمكة نقوم بالعملية التالية :

يتفق اثنان على أن يضع كل منهما اشارة ، الاولى بحذاء رأس السمكة والثانية بحذاء ذنبها ، بشرط أن توضع الاشارتان في لحظة واحدة مقدرة من جملة المجربين ، وبعدها يقاس الطول بين الاشارتين ويكون القياس الناتج هو طول السمكة الساكنة •

أما لو تحركت السمكة في دورق الماء وأعدنا عملية وضع الاشارتين في لحظة واحدة مقدرة من جملة المجربين ، وقسنا المسافة الفاصلة بين الاشارتين ، فهل يكون القياس الناتج في هذه المرة مساويا للطول المقاس في المرة الاولى ؟ والجواب هو « لا » اذ لدينا في هذه الحالة جملتا مقارنة في حالة حركة نسبية : جملة المجربين وجملة السمكة التي تتحرك بدلالة الجملة الاولى بحركة انسحابية منتظمة سرعتها (س) (سرعة السمكة) « والحوادث المتواقتة في احدى الجملتين لا تكون متواقتة في الجملة الثانية » •

فلو تخيلنا كائنا حيا عاقلا على ظهر السمكة لسجل هذا الكائن فارقا زمنيا بين وضع الاشارة بحذاء الرأس ووضع الاشارة بحذاء الذنب لان حادثتي وضع الاشارتين المتوافقتين في جملة المجربين هما غير متوافقتين في جملة الكائن الحي الجالس على ظهر السمكة ، وأثناء الفارق الزمني المذكور سوف تنتقل السمكة مسافة معينة بدلالة جملة المجرب ، ويحق عندها للكائن الحي الجالس على ظهر السمكة أن يؤكد بأن قياس الطول الذي جرى اعتبارا من الجملة الثانية المتحركة بدلالته ليس قياسا صحيحا .

بينما يؤكد أن القياس الذي أجري في المرة الاولى (عندما كانت السمكة ساكنة) هو القياس الصحيح . وذلك لان الحوادث المتوافقة في جملة المجربين تبقى متوافقة في جملة السمكة للسكون النسبي بين الجملتين .

وزيادة في الايضاح نورد المثال التالي :

نتخيل محطات فضائية تجوب الفضاء الكوني ، ونفرض أن هذه الجزر الكونية هي في سكون نسبي (أبعادها النسبية تبقى ثابتة) . يوجد على سطح احدى هذه الجزر مركب صاروخي طويل ، يقاس طول المركب وهو على أرض المحطة بطرق القياس العادية . ثم ينطلق المركب في رحلة فضائية بين هذه الجزر وتضبط ساعات المحطات الكونية (الساكنة بدلالة بعضها) بالطريقة اللاسلكية ، ويطلب قياس طول الصاروخ أثناء رحلته ويتفق في قياس الطول على اتباع الطريقة التجريبية التالية :

في الساعة الثانية عشرة مثلا (مقدرة من جملة المحطات) يرفع الشخص الذي يمر بحذائه رأس الصاروخ علما أحمرا ويرفع الشخص الذي يمر بحذائه ذنب الصاروخ علماً أحمراً أيضاً ويصار بعدها الى

قياس المسافة الفاصلة بين العلمين الاحمرين المرفوعين وتساوي هـذه المسافة طول الصاروخ • فهل يكون الطول المقاس بهذه الطريقة مساويا للطول المقاس على أرض المحطة ؟ والجواب هنا أيضا « لا » فحادثتـا رفع العلمين الاحمرين هما متواقتتان في جملة المحطات الكونية فهما اذا غير متواقتتين في جملة الصاروخ المتحركة بدلالة المحطات • واذا راقب ركاب الصاروخ عملية قياس الطول وجدوا فيها خللا اذ يشاهد هؤلاء الركاب أن أحد العلمين يرتفع قبل العلم الثاني • وفي الفاصل الزمني (المقدر من جملة الصاروخ) المنقضي بين رفع العلمين يكون الصاروخ قد تحرك مسافة معينة • فلا يمكن اذا أن يقبل ركاب الصاروخ بالقياس الذي يعطيه سكان المحطات ويرون قياسهم غير متواقت •

ولا يمكن أن يتفق الفريقان على طريقة ثابتة للقياس ؛ فكل منهم يعتمد زمنا خاصا في قياساته • ولا علاقةللزمن ولا للطول المقاس بالاشياء المقاسة ذاتها وانما لكل جملة متحركة زمنها الخاص وواحدة خاصة بها لقياس الاطوال •

* * *

الفصل الرابع

استنتاج تحويلات لورنتز من فرضيتي اينشتين

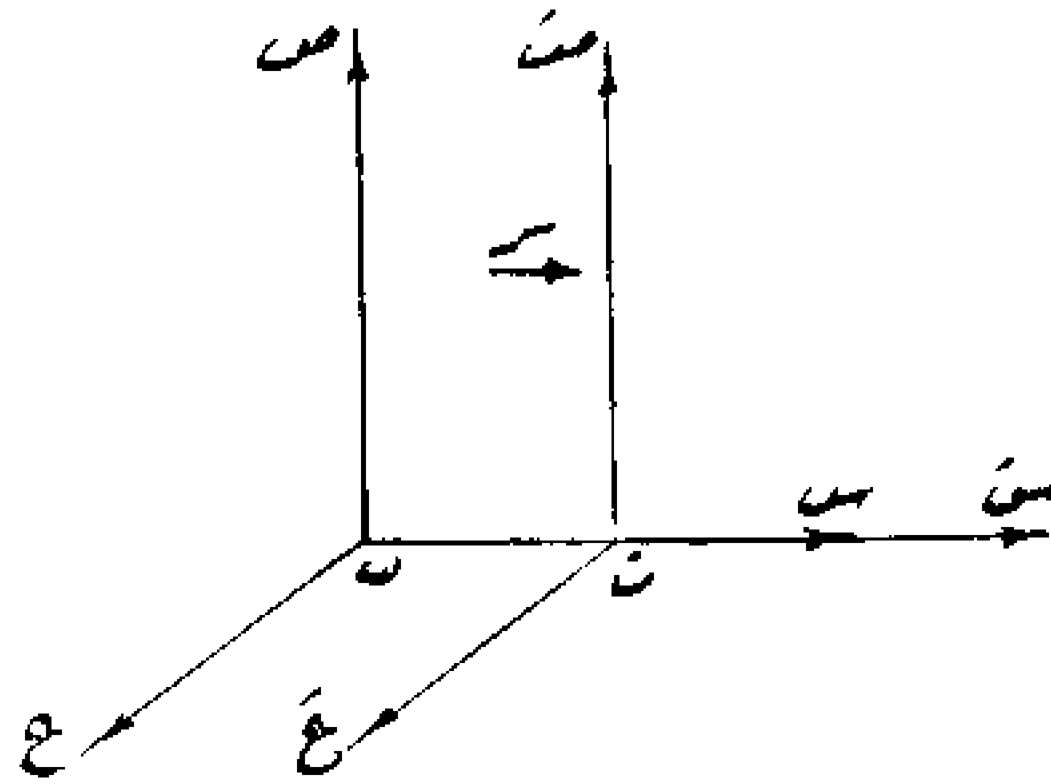
يمكن بالاستناد الى فرضيتي اينشتين استنتاج تحويلات لورنتز التي تجعل القوانين الفيزيائية متماثلة في كافة الجمل العطالية .

نعود لمثال القطار الذي يسير على شريط يوازي رصيف المحطة ونتصور شخصين أحدهما (بَ) يجلس في القطار والثاني (ب) على رصيف المحطة وفي اللحظة (مقدرة من رصيف المحطة مثلا) التي يصل فيها (بَ) الى محاذاة (ب) تقع الصاعقة وتحدث ومضتان ضوئيتان في (ب) و (بَ) .

في هذه اللحظة يضبط كل من (ب) و (بَ) ساعته على اللحظة صفر مثلا وينتشر الضوء من (ب) و (بَ) بسرعة واحدة مستقلة عن سرعة الجملة (فرضية اينشتين الثانية) . واذا كانت حركة القطار مستقيمة منتظمة بدلالة الرصيف ، أمكن لكل من الجملتين الادعاء بحركة الجملة الثانية بدلالتها مع سكونها هي (فرضية اينشتين الاولى) . وبذلك يحق لكل من (ب) و (بَ) أن يدعي ببقائه في مركز انطلاق الموجة الضوئية التي تنتشر بسرعة واحدة في كافة الاتجاهات بسرعة (ث) . نفرض (ب) مبدأ الجملة المقارنة الفراغية المقيدة بالرصيف (م) و (بَ) مبدأ الجملة المقارنة الفراغية المقيدة بالقطار (مَ) (شكل ٤٤) .

نعتبر شريط القطار منطبقا على المحور (س) من الجملة (م) وينطبق (ب) مبدأ الجملة (م) على (بَ) مبدأ الجملة (مَ) في

اللحظـة ز = زَ = صفر بفرض (ز) زمن الجملـة (م) و (زَ) زمن الجملة (مَ) وتتحرك الجملة (مَ) بسرعة (سر) توازي المحورين المنطبقين (س) و (سَ) وتتجه في اتجاههما •



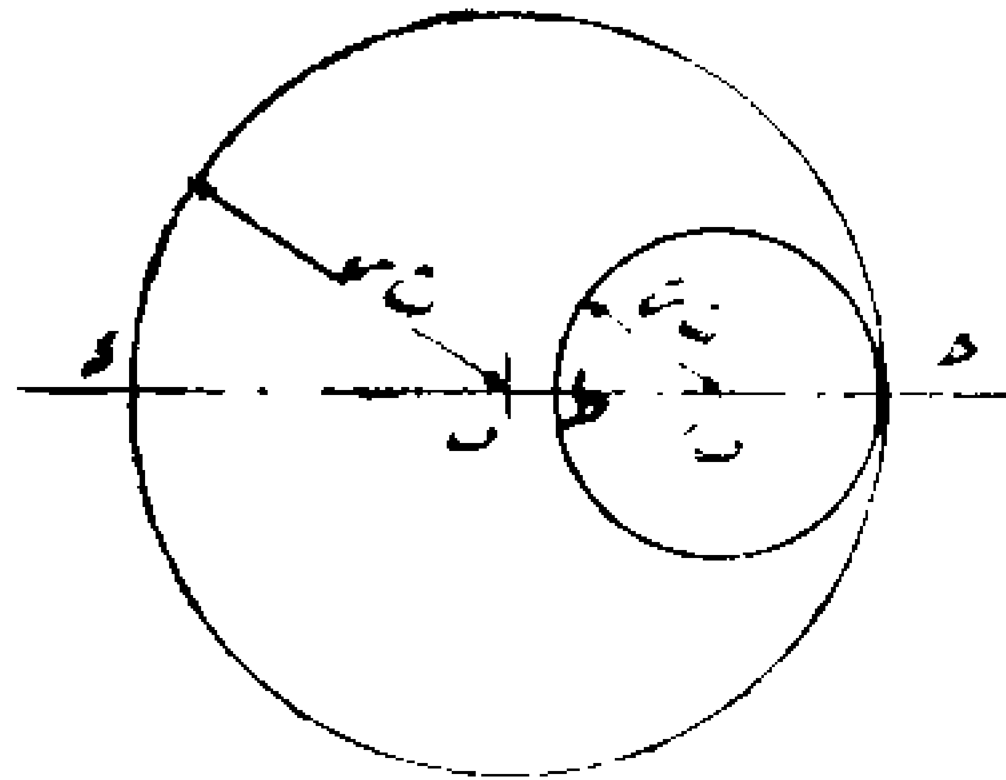
شكل ٤٤

في هذه الحالة يحق لـ (ب) أن يدعي بأن (بَ) يتحرك بـدلالته على المحور (س) بسرعة (سر) تتجه من اليسار الى اليمين كما يحق لـ (بَ) أن يدعي بأن (ب) يتحرك بدلالته على المحور (سَ) بسرعة (سر) تتجه من اليمين الى اليسار •

يرى (ب) الضوء ينتشر من حوله على موجات كروية يزداد نصف قطرها بازدياد الزمن (ز) • وفق العلاقة ر = ث ز (ر نصف قطر الموجة الكروية) كذلك يرى (بَ) الضـوء ينتشر من حوله على موجات كروية يزداد نصف قطرها بازدياد الزمن (زَ) وفق العلاقة رَ = ث زَ (رَ نصف قطر الموجة الكروية) وكل من (ب) و (بَ) على حـق فيما يدعيه ، ولا يحق لنا تأييد أحدهمـا على حساب الآخر • وكل ما نستطيع أن نقوله هو أنه لا يمكن أن يكون للموجتين الكرويتين

مركز واحد وذلك لان (ب َ) و (ب) هم في حالة حركة نسبية انسحابية منتظمة .

وبامكان (ب) أن يقول بوصول الضوء في لحظة واحدة (مقدرة في جملته) الى النقطتين (حـ) و (ء) فحدثتا وصول الضوء الى (حـ) و (ء) هما حادثتان متواقتتان . بدلالة الجملة (ه) (شكل ٤٥) . بينما يدعي (ب َ) أن الضوء الذي يصل الى (حـ) يصل في ذات الوقت الى (ط) وليس الى (ء) . وذلك لان الحادثتين المتواقتتين (حـ) و (ء) بدلالة (ه) لا تكونان متواقتتين بدلالة (ه َ) .



شكل ٤٥

ونحن من ناحيتنا لا نعارض فيما قيل لان كلا من الجملتين (م) و (ه َ) يستعمل زمنا خاصا بجملته ، وساعات كل جملة متواقتة ، ولا يوجد تواقت بين ساعات الجملتين .

وبالاستناد الى فرضية اينشتين الثانية (ثبات سرعة الضوء) يمكن أن نكتب لدى اعتبار انتشار الموجة الضوئية في الاتجاه الموجب للمحور س :

س = ث ز　　أو　　س ـ ث ز = صفر　　(١)

سَ = ث زَ　　أو　　سَ ـ ث زَ = صفر　　(٢)

ويكون في اعتبارنا الموجة المنتشرة في الاتجاه السالب للمحور (س) :

س = ـ ث ز　　أو　　س + ث ز = صفر　　(٣)

سَ = ـ ث زَ　　أو　　سَ + ث زَ = صفر　　(٤)

ونقط المحور (س) المتناظرة بالنسبـة للمبدأ (ب) هي حوادث متواقتة مثنى مثنى في الجملة (م) ٠

كذلك تكون نقط المحور (سَ) المتناظرة بالنسبة للمبدأ (بَ) حوادث متواقتة مثنى مثنى في الجملة (مَ) ٠

ينتج عن مقارنة العلاقتين (١) و (٢) :

سَ ـ ث زَ = د (س ـ ث ز)　　(٥)

حيث (د) عدد ثابت موجب مثلا ٠

كذلك ينتج عن مقارنة العلاقتين (٣) و (٤) :

سَ + ث زَ = ك (س + ث ز)　　(٦)

حيث (ك) عدد ثابت آخر موجب أيضا ٠

نجمع العلاقتين (٥) و (٦) طرفا لطرف وبعد الاصلاح ينتج :

$$\text{سَ} = \frac{\text{د} + \text{ك}}{٢}\,\text{س} + \frac{\text{ك} - \text{د}}{٢}\,\text{ث ز}$$

نضع :　$\frac{\text{ك} + \text{د}}{٢} = \text{ل}$ ،　$\frac{\text{ك} - \text{د}}{٢} = \text{ط}$

ينتـج :　　سَ = ل س + ط ث ز　　(٧)

نطرح المعادلة (٥) من المعادلة (٦) وبعد الاصلاح والابدال ينتج :

ث زَ = ط س + ل ث ز　　(٨)

ومتى علمنا ط و ل أمكن ايجاد من (٧) و (٨) قيمتي (سَ) و (زَ) بدلالة (س) و (ز) •

العلاقة (٧) تكون محققة مهما كانت قيمـــة المتحول (سَ) فاذا وضعنا فيها سَ = صفر نتج : س = — $\frac{ط}{ل}$ ث ز (٩)

و سَ = صفر تعني اعتبارنا للنقطة (بَ) مبدأ الجملة (مَ) •

وبعد فترة زمنية ز [مقدرة من الجملة (م)] تصل النقطة (بَ) الى وضع فاصلته س [في الجملة (م)] :

س = سر ز (١٠)

وترمز سر الى سرعة الجملة (مَ) بدلالة (م) •

وبمقارنة (٩) و (١٠) ينتج :

سر ز = — $\frac{ط}{ل}$ ث ز

وبالتالي :

$\frac{ط}{ل}$ = — $\frac{سر}{ث}$ = - هـ (١١)

وتعطينا العلاقة (١١) النسبة بين (ط) و (ل) متى علمنا السرعتين (سر) و (ث) •

ونكون قد حصلنا على هذه النسبة بالاعتماد فقط على الفرضية الثانية لاينشتين ، ومتى وجدنا علاقـــة ثانية بين (ط) و (ل) أمكن عندها حسابهما . ونحصل على العلاقة الثانيـــة بالاعتماد على فرضية اينشتين الاولى •

وتنص الفرضية الاولى على احتفاظ القوانين الفيزيائية بشكلها في كل من الجملتين العطاليتين ، ويعني هذا الفرض بعدم امكانيـــة الجزم بحركة الجملة العطالية بواسطة قياسات تجرى في هذه الجملة •

فاذا وضعنا مسطرة قياسها واحدة الاطوال في الجملة (م) وكـــان

طولها المقاس في هذه الجملة (ل) مثلا ؛ ثم قيس الطول من الجملة (مَ) المتحركة بدلالة المسطرة وجب أن نحصل عندها على طول (لَ) • ولكن لو وضعنا المسطرة في الجملة (مَ) وقيس طولها لوجد مساويا (ل) واذا قيس الطول من الجملة (م) المتحركة بدلالة المسطرة لكان مساويا (لَ) • وهذا هو مفهوم النسبية عند اينشتين وهذا المفهوم يخالف المفهوم العامي للنسبية •

فاذا قلنا مثلا ترى النملة نفسها صغيرة بالنسبة للفيل وجب بحسب المفهوم العامي للنسبية أن نقول : الفيل يرى نفسه كبيرا بالنسبة للنملة • ولكن لو وضعنا فيلين توأمين في جملتي مقارنة عطاليتين تتحركان بسرعة نسبية (سر) وجد عندها الفيل الاول نفسه كبيرا بالنسبة للفيل الثاني كذلك وجد الفيل الثاني نفسه كبيرا بالنسبة للفيل الاول واذا زالت الحركة النسبية وجد عندها كل من الفيلين نفسه مساويا للفيل الآخر • هذا هو بالضبط مفهوم النسبية كما يبدو من فرضية اينشتين الاولى •

فاذا وضعنا مسطرة قياسها واحدة الاطوال في الجملة (مَ) وقسناها من الجملة (م) وجب اجراء القياس في لحظة واحدة (ز) من لحظات الجملة (م) • نعتبر للسهولة ز = صفر لحظة قياس طول المسطرة ونضع ز = صفر في العلاقة (٧) ينتج :

$$\text{سَ} = \text{ل س} \qquad \text{أي} \qquad \text{س} = \frac{١}{\text{ل}} \text{سَ}$$

أي أن الطول (س) المقاس اعتبارا من الجملة المتحركة (م) يساوي في الحقيقة ($\frac{١}{\text{ل}}$) من المقدار (سَ) الذي يقيس طول الشيء فيما لو كان ثابتا بدلالة الجملة (مَ) واذاوضعنا سَ = ١ (واحدةالاطوال) كان طول واحدة الاطوال فيما لو قيس من الجملة المتحركة (م) مساويا ($\frac{١}{\text{ل}}$)

ويحق عندها لساكني الجملة (م) (أشخاص المحطة) أن ينصحوا ساكني الجملة (مَ) (ركاب القطار) باجراء تصحيح على وحدات قياس الطول في جملتهم بحيث تصبح واحدة الاطوال المستعملة من قبلهم مساوية $\frac{\text{١}}{\text{ل}}$ من القيمة المقررة لها وهي الواحد .

ولو أجريت العملية العكسية ووضعت المسطرة التي طولها واحدة الاطوال في الجملة (م) وقيست هذه المسطرة من الجملة المتحركة (مَ) في لحظة معينة (زَ) من هذه الجملة ولتكن لسهولة الحساب زَ = صفر .

نضع زَ = صفر في العلاقة (٨) ينتج :

$$\text{ط س} + \text{ل ث ز} = \text{صفر}$$

أي :

$$\text{س} = -\frac{\text{ل}}{\text{ط}}\ \text{ث ز}$$

ينبغي لحساب الطول (سَ) ابدال (ز) بقيمتها بدلالة (سَ) ويتم لنا ذلك بواسطة العلاقة (٧) :

$$\text{ز} = \frac{\text{سَ} - \text{ل س}}{\text{ط ث}}$$

$$\text{فيكون سَ} = \text{ل} \left(\frac{\text{ل}^{\text{٢}}}{\text{ط}} \quad \text{ط} \right) \text{س} = \text{ل} \left(\text{١} \quad \frac{\text{ط}^{\text{٢}}}{\text{ل}^{\text{٢}}} \right) \text{س}$$

واذا وضعنا س = ١ (واحدة الاطوال) كان طول واحدة الاطوال فيما لو قيس من الجملة المتحركة (مَ) مساويا : $\text{ل} \left(\text{١} - \frac{\text{ط}^{\text{٢}}}{\text{ل}^{\text{٢}}} \right)$.

ويحق عندها لساكني الجملة (مَ) (ركاب القطار) أن ينصحوا ساكني الجملة (م) (أشخاص المحطة) باجراء تصحيح على واحدة قياس الطول في جملتهم بحيث تصبح الاطوال المستعملة من قبلهم

مساوية : ل (١ — $\frac{ط^٢}{ل^٢}$) من القيمة المقررة لها وهي الواحد •

وبالاستناد الى الفرض الاول لاينشتين ينبغي أن يكون التصحيح المقترح من قبل الجملة (م) مساويا للتصحيح المقترح من قبل الجملة (مَ) وعليه :

$$\frac{١}{ل} = ل \left(١ - \frac{ط^٢}{ل^٢} \right)$$

وبالتـالي :

$$ل^٢ = \frac{١}{١ - \frac{ط^٢}{ل^٢}} \qquad (١٢)$$

والعلاقة (١٢) هي العلاقة الثانية المطلوبة بين (ط) و (ل) •

نبدل في (١٢) $\frac{ط}{ل}$ بقيمتها من (١١) •

ينتـج : $ل^٢ = \frac{١}{١ - هـ^٢}$

أو : $ل = \frac{١}{\sqrt{١ - هـ^٢}}$ (١٣) (ل موجب)

ويكون عندها :

$$ط = \frac{م}{\sqrt{١ - هـ^٢}} \qquad (١٤)$$

وبابدال (ط) و (ل) بقيمتيهما من (١٣) و (١٤) في كل من (٧) و(٨) نجد قيمتي (سَ) و (زَ) بدلالة (س) و (ز) •

$$\text{س}' = \frac{\text{س} - \text{سر}\ \text{ز}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}} \qquad \text{I}$$

$$\text{ز}' = \frac{\text{ز} - \frac{\text{سر}}{\text{ن}^2}\ \text{س}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}}$$

ونكون قد وصلنا بذلك الى تحويلات لورنتز التي نكون قد حصلنا عليها بالاعتماد فقط على فرضيتي اينشتين .

ولم يقبل العلماء بتحويلات لورنتز حين نشرها لافتقارها الى المعنى الفيزيائي ، رغم ما كان لهذه التحويلات من فائدة كبيرة في جعل معادلات ماكسويل تطبق في كافة الجمل العطالية ، ولكن بعد أن توصل اينشتين الى هذه التحويلات بالاعتماد على مفاهيم فيزيائية راسخة ، وجد العلماء أنفسهم مضطرين الى قبولها . واحتلت هذه التحويلات مكانها المرموق في الميكانيك الجديد ، وساعدت في وضع علاقة جديدة لتركيب الحركات ، كما وضحت فكرتي تقلص الاطوال وتمدد الازمنة .

وتأخذ تحويلات لورنتز شكلا مناظرا للشكل (I) فيما لو اعتبرنا الجملة (م) تتحرك بدلالة الجملة (مَ) بسرعة سر اذ يكفي أن نبدل في العلاقتين (I) (س) بـ (س') و (ز) بـ (ز') و (سر) بـ (ـ سر) وينتج :

$$\text{II} \quad \begin{cases} \text{س} = \dfrac{\text{سَ} + \text{سر زَ}}{\sqrt{\text{١} - \text{هـ}^{\text{٢}}}} \\[2ex] \text{ز} = \dfrac{\text{زَ} + \dfrac{\text{سر}}{\text{ن}^{\text{٢}}}\,\text{سَ}}{\sqrt{\text{١} - \text{هـ}^{\text{٢}}}} \end{cases}$$

ولا يطرأ في الحالتين أي تغير على الاحداثيات ع و ص ويكون :

$$\text{III} \quad \begin{cases} \text{ع} = \text{عَ} \\ \text{ص} = \text{صَ} \end{cases}$$

* * *

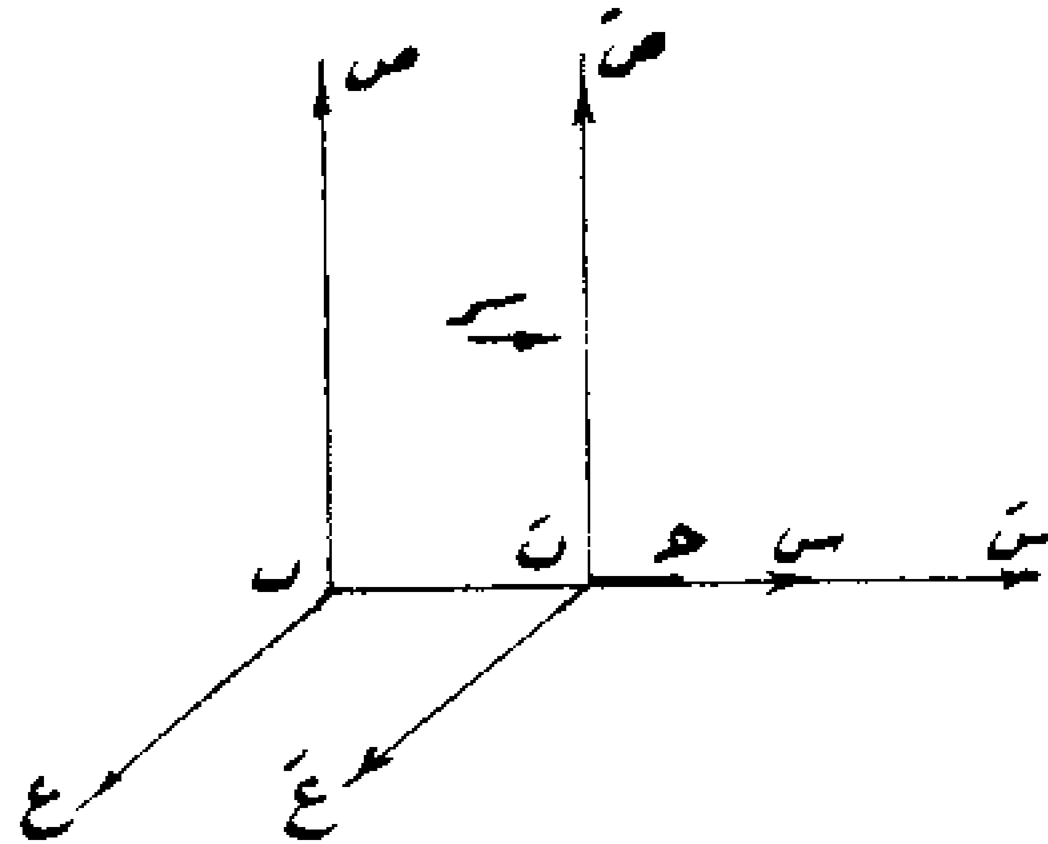
الفصل الخامس

تقلص الاطوال وتمدد الازمنة

تقلص الاطوال :

نعتبر شريطا مستقيما ينطبق على المحور (س) من جملة مقارنة (م) مبدؤها (ب) فاذا كان الشريط ساكنا بدلالة الجملة (م) أمكن قياس طوله بسهولة وليكن ل الطول المقاس ٠

نفرض الآن أن الشريط أخذ يتحرك حركة انسحابية منتظمة على المحور (س) بسرعة (سر) ٠ يمكننا في هذه الحالة اعتبار الشريط ساكنا في جملة مقارنة (مَ) مبدؤها (بَ) وينطبق محورها (سَ) على الشريط (شكل ٤٦) ٠



شكل ٤٦

نعتبر المبدأ (بَ) منطبقا على بداية الشريط ونفرض أن (بَ) ينطبق على (ب) لحظة قياس طول الشريط .

اذا قيس الشريط من الجملة (مَ) (الساكنة بدلالته) كان طوله المقاس هو أيضا ل. لتكن (حـ) نهاية الشريط لدينا في هذه الحالة :

$$بَ حـ = سَ = ل.$$

وللحصول على الطول (ل) المقاس من الجملة (م) يكفي حساب فاصلة (حـ) أي (س) بدلالة هذه الجملة .

نقيس الطول في لحظة معينة من لحظات الجملة (م) ولتكن (ز) هذه اللحظة ولنفرض للسهولة أن ز = صفر .

نضع ز = صفر و سَ = ل. و س = ل في علاقتي لورنتز :

$$س = \frac{سَ + سر زَ}{\sqrt{١ - هـ^٢}} ، ز = \frac{زَ + \frac{سر}{ن^٢} سَ}{\sqrt{١ - هـ^٢}}$$

$$ل = \frac{ل. + سر زَ}{\sqrt{١ - هـ^٢}} ، صفر = \frac{زَ + \frac{سر}{ن^٢} ل.}{\sqrt{١ - هـ^٢}}$$

نستخرج من العلاقة الثانية قيمة زَ الموافقة للقيمة ز = صفر :

$$زَ = - \frac{سر}{ن^٢} ل.$$

نبدل زَ بقيمتها في قيمة ل :

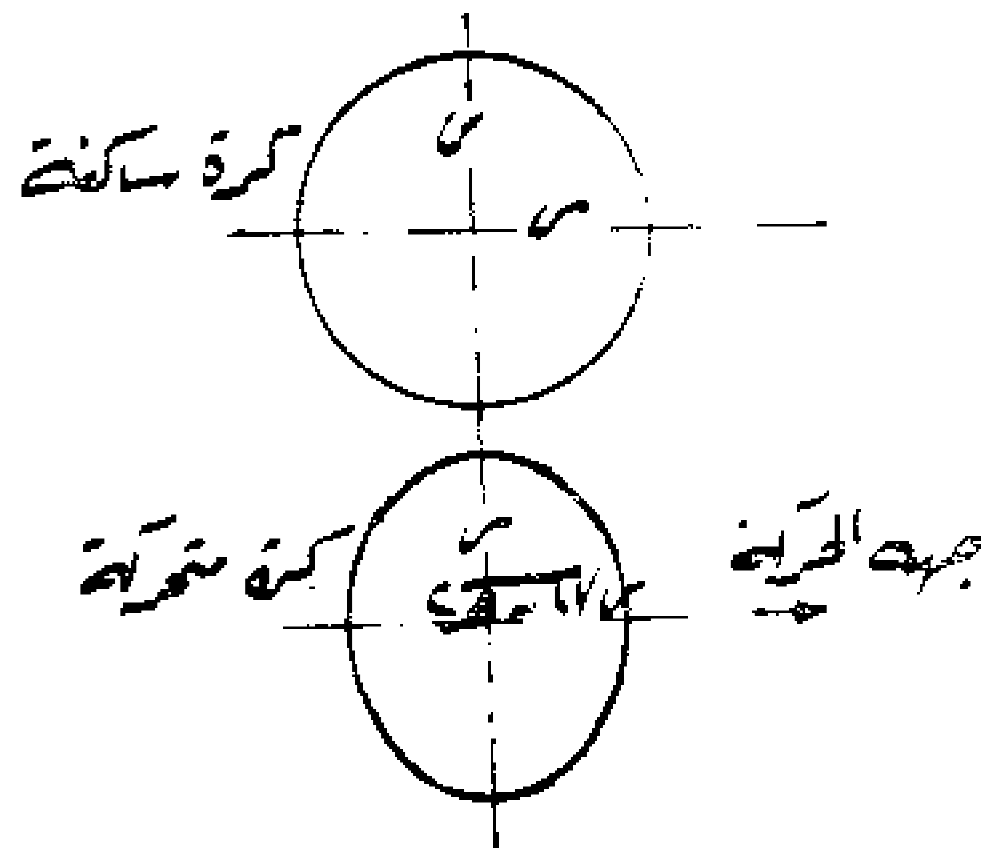
$$ل = \frac{ل. (١ - \frac{سر^٢}{ن^٢})}{\sqrt{١ - هـ^٢}} = \frac{ل. (١ - هـ^٢)}{\sqrt{١ - هـ^٢}}$$

ومنـــه :

$$ل = ل_{٠} \sqrt{١ - هـ^{٢}} \qquad (١)$$

وتبين لنا العلاقة (١) أن الشريط المتحرك بدلالة الناظر بسرعة (سر) يبدو لهذا الناظر أقصر مما لو قيس وهو ساكن بدلالة الناظر • ونعبر عن ذلك بقولنا : « تتقلص الاجسام المتحركة في اتجاه حركتها » •

فاذا أخذنا كرة نصف قطرها (ر) وهي ساكنة وحركنا هذه الكرة وقسنا أبعادها وهي متحركة ، بدت عندها للمشاهد وكأنها مجسم قطع ناقص دوراني ينطبق محوره الصغير على جهة الحركة وقياسه : ($٢ ر \sqrt{١ - هـ^{٢}}$) • (شكل ٤٧) •



شكل ٤٧

وهذه هي النتيجة التي وصل اليها العالم لورنتز بالاستناد الى مفهوم البنية الذرية الكهربائية للمادة • وقد آلت فرضيات اينشتين المنطقية الى نتائج مماثلة •

تمدد الازمنة :

نتصور ساعة تدق الثواني موضوعة في النقطة (ب) مبدأ الجملة المقارنة (م) نعتبر ضربتين متتابعتين للساعة : الاولى في اللحظة ز = صفر والثانية في اللحظة ز = ١ (مقدرة من الجملة م) •

نفرض الآن شخصا يتحرك بدلالة الساعة بحركة انسحابية منتظمة في اتجاه المحور (س) وبسرعة (سر) • نعتبر الشخص في نقطة (ب َ) مبدأ الجملة المقارنة (م َ) يسمع الشخص ضربتي الساعة ويعتبر الفاصلة الزمنية بين الضربتين واحدة للزمن في جملته (م َ) •

تعطينا تحويلات لورنتز العلاقة بين واحدتي الزمن في الجملتين (م) و (م َ) :

$$\text{س}' = \frac{\text{س} - \text{سر ز}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}} \text{ ، } \text{ز}' = \frac{\text{ز} - \frac{\text{سر}}{\text{ث}^2}\text{س}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}}$$

بالنسبة للحادثة الموافقة للضربة الاولى يكون س = صفر و ز = صفر فاذا بدلناهما في علاقة س َ نتج س َ = صفر • واذا بدلناهما في علاقة ز َ نتج ز َ = صفر ويعني ذلك أن الحادثة الفيزيائية الموافقة للضربة الاولى تتم حين تكون الساعة في النقطة (ب َ) مبدأ الجملة (م َ) في اللحظة ز َ = صفر مقدرة في هذه الجملة •

والحادثة الموافقة للضربة الثانية تحدد في الجملة (م) بالاحداثيين : س = صفر و ز = ١ نبدلهما في علاقتي لورنتز ينتج :

$$\text{س}' = \frac{-\text{سر}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}} \text{ ، } \text{ز}' = \frac{1}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}}$$

ويعني ذلك ان الحادثة الفيزيائية الموافقة للضربة الثانية (بدلالة

الجملة مَ) ثم حين تصبح الساعة في وضع فاصلته $\frac{\text{سر}}{\sqrt{١ - هـ^٢}}$ وفي اللحظة

$$\text{زَ} = \frac{١}{\sqrt{١ - هـ^٢}}$$

والفاصلة الزمنية بين ضربتي الساعة تبدو للناظر الساكن بدلالتها مساوية ثانية واحدة ، بينما تبدو للناظر المتحرك بدلالتها أكبر من ثانية واحدة • واذا كان بحوزة المشاهد المتحرك ساعة مماثلة الصنع للساعة الساكنة وجد هذا المشاهد ان ثواني ساعته (الفاصلة الزمنية بين ضربتين) لم تعد مساوية لثواني الساعة المتحركة بدلالته ، بل تبدو ثواني الساعة المتحركة بدلالته أكبر من ثواني الساعة الساكنة بدلالته • ونقول بأن الساعة المتحركة بدلالة الشخص تؤخر عن الساعة المماثلة التي يحملها هذا الشخص •

ولما كان لكل من الجملتين (م) و (مَ) الحق في أن تدعي بأنها ساكنة فان الناظر من الجملة (م) الى ساعات الجملة (مَ) يجد هذه الساعات تؤخر عن ساعته ، كذلك يجد الناظر من الجملة (مَ) الى ساعات الجملة (م) ساعات هذه الجملة تؤخر عن ساعته •

وبصورة عامة يمكننا أن نكتب بفرض (ز.) الازمنة المقاسة من قبل الشخص الساكن و ز الازمنة المقاسة من قبله وهو متحرك •

$$\boxed{\text{ز} = \frac{\text{ز.}}{\sqrt{١ - هـ^٢}}} \qquad (٢)$$

وتسمى العلاقة (٢) بعلاقة تمدد الازمنة •

فالساعة الملصقة بالجسم المتحرك تسير بسرعة أبطأ من سرعة الساعة

الساكنة . والمسطرة الملتصقة بالجسم المتحرك يتغير طولها أثناء حركتها ويزداد هـذا التغير بازدياد سرعة الجسم • والساعة تؤخر كلما زادت السرعة والمسطرة تنكمش ويقصر طولهـا في اتجاه حركتها ، وهـذه التغيرات الغريبة لا علاقـة لها بتكوين الساعـة أو تركيب المسطرة • فالساعة يمكن أن تكون من نوع ساعة الحائط ذات البندول أو مـن نوع ساعة الجيب أو ساعة بيولوجية كالقلب أو الخلية الحيوانية •••الخ والمسطرة يمكن ان تكون من الخشب أو من المعدن • فتأخير الساعـة أو انكماش المسطرة ليسا من الظواهر الميكانيكيـة ، اذ أن الشخص المرافق للساعة والمسطرة لا يمكنه مشاهدة هذه التغيرات • أما اذا كان الشخص ساكنا (أي ساكنا بالنسبة للجسم المتحرك) فانه يمكن ان يلاحظ ان الساعة المتحركة قد تأخرت بالنسبـة للساعة الساكنـة وان المسطرة المتحركة قد انكمشت بالنسبة الى المسطرة الساكنة •

ولما كانت الحركة نسبية (فرضية اينشتاين الاولى) فان شخصـا آخر يحمل معه ساعةومسطرة ، اذا كان متحركا بالنسبة للشخص الاول . فبامكانه ان يدعي انه ثابت والمتحرك هو الشخص الآخر وتؤخر ساعة الشخص الاول بالنسبة لساعته كما تنكمش مسطرة الاول بالنسبـة لمسطرته • فالعملية اذن ليستعكسية ، فان الشخص الثاني لا يرى الساعة الاولى تقدم على ساعته والمسطرة الاولى تتمدد بدلالة مسطرته بـل يلاحظ عين الشيء الذي يلاحظه الشخص الاول . فالساعة الاولى تؤخر بدلالة ساعته والمسطرة الاولى تنكمش ايضا بدلالة مسطرته •

وقد وضع العالم الفرنسي لانجفين (Langevin) ظاهرة تمدد الازمنة بمثال يعرف حتى اليوم بمثال رحالة لانجفين (Voyageur de Langevin) يقول : اذا تخيلت صاروخا ينطلق مـن على سطح الارض ويتجول في الفضاء الكوني بحركة مستقيمة منتظمة بسرعة قريبة من سرعة الضوء

ويعود بعدها الى الارض من جديد ، وجد ركاب الصاروخ عند عودتهم الى الارض أحفادهم أو أولادهم أكبر سنا منهم .

ويعلل لانجفين ذلك بالاستناد الى ظاهرة تمدد الازمنة لان الصاروخ ومن فيه يتحرك بدلالة الارض بسرعة قريبة من سرعة الضوء (هـ قريبة من الواحد) وفي هذه الحالة يرى سكان الارض ان ساعات الصاروخ المعدنية منها والبيولوجية تتأخر عن ساعاتهم بمقادير تزداد بازدياد سرعة الصاروخ . واذا تأخرت الساعات البيولوجيـــة تباطأت ضربات القلب وحركة الشهيق والزفير وحركة نمو الخلايا .. الخ ، ويتباطأ معها نمو ركاب الصاروخ وعند عودتهم الى الارض يرون أحفادهم أكبر منهم سنا .

واعترض العلماء على هذا المثال وقالوا : الصاروخ يتحرك بدلالة الارض كما ان الارض تتحرك أيضا بدلالة الصاروخ وما يلاحظه سكان الارض في ركاب الصاروخ ينبغي أن يلاحظه ركاب الصاروخ في سكان الارض (النظرية النسبية) وعليه ينبغي أن تؤخر ساعـــات الارض « المتحركة » بالنسبة لساعات الصاروخ « الثابت » فاذا عاد الصاروخ الى الارض وجب أن يكون ركابه أكبر سنا من آبائهم وأجدادهم .

وخلص العلماء من هذه المناقشة الى نتيجتين متعاكستين فركـــاب الصاروخ ينبغي ان يكونوا في ذات الوقت أصغر من أولادهم وأحفادهم وأكبر من آبائهم وأجدادهم وهذا هو عين التناقض والنظرية النسبيـــة تناقض ذاتها بذاتها .

وادى هذا المثال جدلا حادا أوشك على الاطاحة بالنظرية النسبية الجديدة ولم يتضح للعلماء الا بعد ان نشر اينشتين نظرية النسبية العامـــة التي تناول فيها دراسة الحركات المتسارعة وعلاقاتها بالمجالات الجاذبـــة . فالصاروخ الذي يترك الارض لا يبلغ سرعته الكبيرة بصورة آنية بل يمر بمرحلة تكون فيها حركته متسارعة وتصبح بعدها الحركة منتظمة

ويبتعد أثناءها الصاروخ عن الارض ؛ فاذا رغب بالعودة الى مكان انطلاقه اضطر أولا في المكان البعيد عن الارض الى ابطاء حركته حتى الانعدام ثم تسارعها من جديد في الاتجاه المعاكس ليبلغ سرعته السابقة ، وبعدها يسير بحركة منتظمة ، وبجوار الارض يعود ويبطيء حركته حتى الانعدام عند الهبوط على الارض •

فبالاضافة الى الحركة المنتظمة يتعرض الصاروخ الى أربع حركات متغيرة يشعر بها ركاب الصاروخ ولا يشعر بها سكان الارض •

فالصاروخ هو وحده الذي يتعرض الحركة المتسارعة ، وفي خلالها تؤخر الساعات الموجودة فيه بدلالة ساعات الارض ويتباطأ نمو ركاب الصاروخ بالنسبة لسكان الارض ، وعند عودتهم يجدون أبناءهم وأحفادهم أكبر سنا منهم •

والسلوك المنفرد هذا للساعة والمسطرة المتحركتين ؛ انما مرجعه ثبات سرعة الضوء ، وهذا السلوك يعلل لماذا يلاحظ الاشخاص بأن الضوء يصل الى أجهزتهم ويبتعد عنها بذات السرعة سواء أكانوا ساكنين أم متحركين • وذلك لانه كلما قاربت سرعاتهم سرعة الضوء كلما زاد تأخير ساعاتهم ؛ وكلما زاد انكماش مساطرهم أي أن كافة قياساتهم تصل الى المقادير التي يسجلها الاشخاص الساكنون نسبيا •

والقوانين التي تحدد مقدار الانكماش ومقدار التأخير هي تحويلات لورنتز • والمسطرة التي تصل سرعتها الى ٪٩٠ من سرعة الضوء تنكمش الى نصف طولها تقريبا ويزداد مقدار الانكماش بازدياد السرعة حتى اذا وصلت سرعة المسطرة الى سرعة الضوء فانها سوف تنكمش الى درجة يصل معها طولها الى الصفر • وبالمثل فان الساعة المتحركة بسرعة الضوء سوف تقف تماما •

وينتج عن ذلك ان جميع الاجسام لا تستطيع ان تصل الى سرعة الضوء مهما كانت القوى المحركة لهذه الاجسام عظيمة •

وهكذا نجد ان النظرية النسبية الخاصة توضح قانونا أساسيا من قوانين الكون وهو : « ان سرعة الضوء هي الحد الاعلى لجميع السرعات في الكون » .

ان هذه الحقائق تبدو لاول وهلة صعبة لا يمكن ادراكها ، ولكن ذلك يرجع الى أن علم الطبيعة الكلاسيكية قد افترض دون وجه حق بأن الاجسام تحافظ على أبعادها سواء أكانت في حركة أم في سكون وان الساعة تحافظ على فواصل أوقاتها في السكون أو الحركة على السواء ، والعادة هي التي تملي علينا هذا القول . وقد أشار اينشتين الى أن هذه العادات والافكار انما هي رواسب من التعصب رسخت في عقولنا قبل سن الثامنة عشرة .

وكل رأي جديد بعد هذه السن لابد ان يصطدم مع الآراء القديمة ولكن تحرر اينشتين من قيود الآراء المعتادة هو الذي أعانه على أن ينفذ الى حقائق الكون ويقترب منها أكثر مما فعل أي عالم آخر من قبله . فقد تساءل لماذا ندهش من ان الساعة المتحركة تؤخر ؟ وان المسطرة المتحركة تنكمش ، ولماذا لاندهش من العكس ؟ والسبب يرجع الى أن الطبيعة الكلاسيكية قد اتخذت لنفسها الرأي الاخير كانه قضية مسلم بها .

ولان الانسان في حياته اليومية لم يعرف سرعة كبيرة تستطيع أن تجعل هذه التغيرات واضحة له ، فان مقدار الانكماش في المسطرة أو التأخير في الساعة صغير جدا لا يمكن ادراكه بالقياس في حالات السرعة الخاصة بالسيارة أو الطائرة أو الصاروخ ، ولكن هذه المقادير تصبح كبيرة ويمكن ادراكها في الحالة التي تقارب فيها السرعة سرعة الضوء .

والنظرية النسبية لا تتعارض مع الطبيعة الكلاسيكية ، اذ انها تعتبر الافكار القديمة كانها حالات خاصة تنطبق على شؤون الحياة العادية للانسان .

واورد العالم الفيزيائي جورج غامو (George gamow) في كتابه « مستر طمكنز في بلاد العجائب » الرواية التالية التي توضح فكرة انكماش الاطوال وتأخر الساعات .

وجد طمكنز نفسه في بلد عجيب ينتشر فيه الضوء بسرعة ١٥ كم في الساعة ، وتجري فيه الحياة عادية كما هو عليه الحال في باقي مدننا .

كان أول شخص صادفه طمكنز هو شرطي البلدة الذي كان يقف في زاوية من الشارع ينظم حركة المارة وهو شاب ممتلىء قوي البنية . ونظر طمكنز الى ساعة البرج فوجدها تقارب الثانية عشرة ظهرا فضبط عليها ساعة يده وكان الشارع في مثل هذه الساعة مقفرا الا من بعض المارة ومن شاب يمتطي دراجته ويقترب منه ببطء شديد . فنظر طمكنز الى الشاب وانتابته الدهشة اذ بدا له الشخص ودراجته مسطحين وكأنهما انكمشا في جهة الحركة كما لو نظر اليهما من وراء عدسة اسطوانية . وفي هذه اللحظة دقت ساعة البرج الثانية عشرة وعندها أخذ الشخص يبذل جهدا كبيرا لزيادة سرعته غير ان الجهد المبذول لم يعط مفعوله فلم تزدد سرعة الدراجة كثيرا عما كانت عليه غير ان انكماشها قد تضاعف حتى بدت لطمكنز وكأنها اقتطعت مع راكبها من صفيحة من المقوى . وعلل طمكنز ظاهرة الانكماش هذه الى اقتراب سرعة الدراجة من سرعة الضوء أي من ١٥ كم/ساعة . وفي هذه الاثناء ظهرت سيارة كانت تصدر ضجيجا مزعجا دلالة على بلوغ سرعتها العظمى فنظر نحوها ولم يشعر بأن سرعة السيارة تفوق بكثير سرعة الدراجة فهي ما كانت لتبلغ سرعة ١٥ كم/ساعة غير انها بدت له مسطحة وكأنها انكمشت في اتجاه حركتها .

وأراد طمكنز اللحاق بالدراجة فأخذ دراجة وامتطاها وعندما نظر حوله لاحظ في الطبيعة المحيطة به تبدلا ملموسا . الشوارع قصرت

وضاقت أبواب واجهات المخازن حتى بـدت فتحات مستطيلة قليلـة العرض ، كما بدا له الشرطي شخصا نحيلا مسطحا .

وقال طمكنز : الآن فهمت معنى النسبيـة : « كل ما هو متحرك بالنسبة لي ينكمش في اتجاه الحركة » .

وضاعف طمكنز الجهد ليلحق بالدراجة الاولى ، وبعد لأي وصل الى محاذاتها وعندها بدا له راكب الدراجة شخصا طبيعيا ممتلىء الجسم . ودار بين الاثنين الحوار التالي :

طمكنز : ألا ترى يا صاح أن العيش في بلدة محكوم عليها بسرعة حدية أمر لا يطاق ؟

الشخص : ماذا تريد أن تعني يارجل بالسرعة الحدية ؟ ليس عندنا هنا قانون يحدد السرعة فنحن يمكن أن ننتقل كما نشاء وبأي سرعـة نريد ، اعطني سيارة وسوف أريك السرعة التي أقودها بها .

طمكنز : مضى علي زمن وأنا أراقبك فوجدتك مهما بذلت من جهد لا تبلغ الا سرعا صغيرة .

الشخص : أنا أسير ببطء ؟ ألم تشعر أننا قطعنا منذ بدأنا الحديث خمس مجموعات من المنازل ؟ وتقول بعدها ان سرعتنا قليلة ؟

طمكنز : نعم لقد قطعنا خمس مجموعات من المنازل ولكن لا تنس ان هذه المنازل قد انكمشت الى حد أصبح معها عرضها قليلا جدا .

الشخص : وماذا يعنيني ذلك ؟ المهم أني قطعت هذه المسافة في زمن قصير ، وعلي أن أقطع عشر مجموعات من المنازل حتى أبلغ بناية البريد ، فاذا بذلت جهدا كبيرا قصرت الشوارع وضاقت المنازل وبلغت غايتي في فترة زمنية قصيرة ، ألا يعني هذا أن سرعتي كانت كبيرة ؟

وهنا وصل الاثنان الى بناية البريد ونظر طمكنز الى ساعة البناء فوجدها تشير للثانية عشرة والنصف • ابتسم هنا وقال لرفيقه : ألا ترى يا أخ أنك أضعت نصف ساعة حتى وصلت بناية البريد ؟ فقد كانت الساعة تشير الى الثانية عشرة عندما صادفتك •

وأجاب الآخر : ولكن بربك قل لي هل شعرت أنت بمرور النصف ساعة تلك ؟

ووافقه طمكنز على قوله لانه بالفعل قد خال هذه النصف ساعة بضع دقائق ولولا الساعة التي أمامه لما صدق أنه مضى عليه نصف ساعة منذ ان ركب الدراجة • ونظر الى ساعة يده فوجدها تشير للثانية عشرة وخمس دقائق فقال : الحق معك أيها الصديق ان ساعة البريد تقدم على ساعتنا • وأجابه رفيقه : بل قل ان ساعتك تؤخر عن ساعة البريد لكونك تتحرك بدلالتها • ولكن بحق الآلهة قل لي ماذا أصابك هل أنت آت من القمر ؟ ودخل الشاب بناية البريد تاركا طمكنز وشأنه •

ضبط طمكنز ساعته على ساعة البريد ومكث واقفا أمامها عشر دقائق ليتأكد من دقة سيرها ، فوجدها تسير متوافقة مع ساعة يده وعجب للامر وتابع سيره يبحث عن شخص آخر ليساعده في حل هذا اللغز الغريب فوصل بعد برهة الى باب محطة القطارات ونظر الى ساعة المحطة فوجدها تقدم مليلا على ساعة يده وزادت حيرته ، وبينما هو كذلك اذ به يشاهد قطارا يدخل المحطة وينزل منه شاب ممتلىء في العقد الرابع من عمره وتقدمت من هذا الشاب عجوز في العقد السابع من عمرها وهي تهتف : « أهلا وسهلا بجدي العزيز » •

وطار صواب طمكنز وهرع نحو الشاب وسأله والانفعال باد عليه : قل لي بربك أصحيح انك جد هذه العجوز ؟

وابتسم الشاب قائلا : نعـم ياعزيزي أنا جد هذه العجـوز ولماذا

تستغرب ذلك ؟ ألا ترى أني رجل أعمال فأعمالي الكثيرة تضطرني الى السفر الدائم في القطار • وتأبط الشاب ذراع حفيدته وانصرف تاركا طمكنز يلعن الساعة التي دخل فيها بلدة العجائب هذه •

ودخل طمكنز الى المقهى وأخذ يتأمل بما سمعه من الشاب وعـادت الى ذاكرته فكرة تمدد الازمنة مع الحركة وظن عندها انه وجد ضالته ولكنه ما لبث أن قال لنفسه : الحركة تسبب تأخر الساعات وتبطيء الحياة ، ولكن الحركة نسبية فهذا الشاب يتحرك مع قطاره بدلالة حفيدته كما ان حفيدته تتحرك مع البلدة بدلالة القطار ويفترض في هذه الحركة أن تبطيء حياة الحفيدة ، تماما كما تبطيء حركة القطار حياة جدها ، ولكن ما أقوله لا معنى له • وقرر عندها طمكنز ان يقوم بمحاولة استطلاع جديدة علّه يكتشف السر ، ونظر من حوله فوجد رجلا جالسا بجواره يشرب القهوة فاستدار نحوه وسأله :

هلا تفضلت يا أخ واخبرتني عن المسؤول في كون ركاب القطـار يحافظون على شبابهم في الوقت الذي يشيخ فيه سكان البلدة ؟ وابتسم الرجل وقال : أنا هو المسؤول عن ذلك •

ودهش طمكنز وقال : لي الشرف اذاً بأن أتحدث مع علامة كبـير وطبيب لامع اكتشف سر اطالة الحياة •

وأجابه الرجل على الفور : لا تهزأ بي أيها الغريب أنا لست علامة ولا طبيبا وانما عاملا بسيطا في هذه المحطة وظيفته تنظيم حركة وقوف القطار عند دخوله المحطة وبعملي المتواضع هذا اتعاون مع سائق القطار في اطالة أعمار المسافرين •

وفهم طمكنز الموضوع وهتف لنفسه : يتعرض المسافر في القطـار الى تسارعات (أثناء اقلاع القطار وأثناء وقوفه) لا يتعرض لها غيرهم

ممن يقطنون المدينة وتسبب الحركة المتغيرة التي يتعرض لها المسافر في بانيي ما أعاني القطار من معدنية وبيولوجية ... الخ .

كانت هذه هي قصة المستر طمكنس في بلاد العجائب التي رواها لنا العالم جورج غامو وهي تشرح ظاهرتي تقلص الاطوال وتمدد الازمنة بشكل مسل ومفيد في الوقت ذاته .

* * *

الفصل السادس

تركيب الحركات

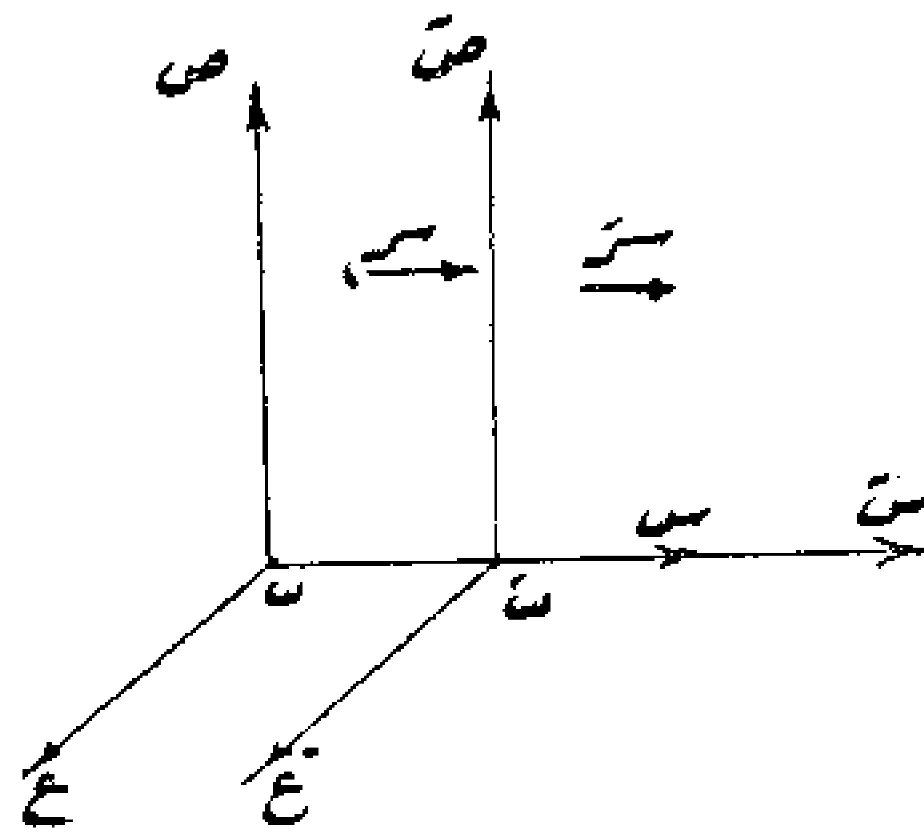
من المستحيل التحقق تجريبيا من ظاهرتي انكماش الاطوال وتأخير الساعات ، وذلك لان السرع الطبيعية مهما عظمت لا تساوي الا جزءا يسيرا من سرعة الضوء مما يجعل النسبة $\frac{\text{سر}}{\text{ث}}$ = هـ صغيرة جـدا بالنسبة للواحد .

وتمكننا تحويلات لورنتز من استنتاج علاقة جديدة لتركيب السرع أمكن التحقق منها تجريبيا .

لقد أوصلتنا تحويلات غاليله في السابق الى علاقة تركيب السرع :

$$\text{سر} = \text{سر}_1 + \text{سر}$$

تمثل (سر_1) السرعة النسبية بين الجملتين العطاليتين (م) و (مَ) وهي توازي المحورين المنطبقين (س) و (سَ) (شكل ٤٨) وترمز



شكل ٤٨

(سرَ) لسرعة جسم يتحرك بدلالة الجملة (مَ) في اتجاه يوازي المحور (سَ) • وتكون سر هي سرعة الجسم المذكور بدلالة الجملة (م) وتوازي هذه السرعة المحور (س) •

نطبق تحويلات لورنتز على الجملتين العطاليتين (م) و (مَ) •

نفرض المبدأين (ب) و (بَ) منطبقين في اللحظتين ز = زَ = صفر • ونفرض ان الجسم ينطبق في هذه اللحظة على المبدأ (بَ) •

بعد فترة زمنية (زَ) مقدرة في الجملة (مَ) يصل الجسم المتحرك على المحور (سَ) الى الوضع : سَ = سرَ زَ

نبدل سَ و زَ بما يساويهما في معادلتي لورنتز :

$$\text{سَ} = \frac{\text{س} - \text{سر}_{١}\,\text{ز}}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}} \quad ، \quad \text{زَ} = \frac{\text{ز} - \frac{\text{سر}_{١}}{\text{ث}^{٢}}\,\text{س}}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}}$$

ينتــج :

$$\frac{\text{س} - \text{سر}_{١}\,\text{ز}}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}} = \frac{\text{سرَ}\left(\text{ز} - \frac{\text{سر}_{١}}{\text{ث}^{٢}}\,\text{س}\right)}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}}$$

وبعد الاختصار والاصلاح نحصل على العلاقة الجديدة التي تعرف بعلاقة تركيب السرع في الميكانيك الجديد :

$$\boxed{\text{سر} = \frac{\text{سر}_{١} + \text{سرَ}}{١ + \frac{\text{سر}_{١}\,\text{سرَ}}{\text{ث}^{٢}}}}$$

تدلنا العلاقة اعلاه اننا طالما بقينا في مجال الميكانيك الكلاسيكي أي عندما نقتصر على السرع الصغيرة جدا بالنسبة لسرعة الضوء أمكننا عندها اهمال الحد $\frac{\text{سر}_1 \text{سر}'}{\text{ث}^2}$ بالنسبة للواحد ، ونحصل في هذه الحالة على العلاقة :

$$\text{سر} = \text{سر}_1 + \text{سر}'$$

وهي علاقة تركيب السرع في الميكانيك الكلاسيكي •

ولا نطبق علاقة التركيب الجديدة الا متى أصبحت السرع قريبة من سرعة الضوء •

فاذا سار قطار على شريط يوازي رصيف المحطة بسرعة سر_1 بالنسبة للرصيف وانطلقت داخل القطار وفي اتجاه الحركة ومضة ضوئية بسرعة $\text{سر}' = \text{ث}$ (فرضية اينشتين الثانية) • وأردنا حساب (سر) سرعة الومضة الضوئية بدلالة جملة الرصيف طبقنا عندها العلاقة الجديدة لتركيب السرع :

$$\text{سر} = \frac{\text{سر}_1 + \text{ث}}{1 + \frac{\text{سر}_1 \text{ث}}{\text{ث}^2}} = \frac{\text{سر}_1 + \text{ث}}{\frac{\text{سر}_1 + \text{ث}}{\text{ث}}} = \text{ث}$$

ويعني هذا ان سرعة الضوء بدلالة الرصيف تبقى محافظة على قيمتها بدلالة القطار ، وينتشر الضوء بسرعة ثابتة في كافة الجمل العطالية بغض النظر عن حالتها الحركية •

وتمكننا أيضا العلاقةالجديدة من أن نجزم بأنه مهما كانت سر_1 و $\text{سر}'$ كبيرتين (شرط أن تكونا أصغر من ث) فاننا لن نحصل بتركيبهما على سرعة أكبر من سرعة الضوء •

فاذا سارت الجملة (مَ) بـدلالة الجملة (م) بسرعـة $سر_{١}$ = ٢٠٠ ٠٠٠ كم/ثا مثلا •

وتحرك جسم بدلالة الجملة (مَ) بسرعة سرَ = ٢٠٠ ٠٠٠ كم/ثا أيضـا •

وطبقنا العـلاقة الكلاسيـكية لتركيب السرع لحصلنا عـلى : ٢٠٠ ٠٠٠ + ٢٠٠ ٠٠٠ = ٤٠٠ ٠٠٠ كم/ثا •

بينما تعطينا العلاقة الجديدة :

$$سر = \frac{٢٠٠٠٠٠ + ٢٠٠٠٠٠}{١ + \frac{٢٠٠٠٠٠ \times ٢٠٠٠٠٠}{(٣٠٠٠٠٠)^{٢}}} = \frac{٤٠٠٠٠٠}{١ + \frac{٤}{٩}} = ٢٧٦٩٢٣ \text{ كم/ثا}$$

والسرعة الجديدة كما يبدو أصغر من سرعة الضوء •

والسؤال الآن ما الذي يؤكد لنا عدم صحة العلاقة القديمة وصلاحية العلاقة الجديدة ؟

والجواب على هذا السؤال هو : التجارب الواقعية هي وحدهـا الكفيلة بفرض العلاقة الصحيحة •

سبق وذكرنا في فصل « المبادىء الاساسية في علم الضوء » كيف أن العالم فرنل نقض فكرة سكون الوسط الاثيري ، وفرض هـذا الوسط يشترك جزئيا في حركة الاجسام المادية المغمورة فيه ، ووجد بالحساب الرياضي ان عامل انسحاب الوسط الاثيري هو $\frac{سر_{١}}{ن^{٢}}$ بفرض (ن) قرينة انكسار الوسط المادي الذي يخترقه الضوء ، وهي تساوي النسبة بين سرعة انتشار الضوء في الخلاء (ث) وسرعتـه في الجسم المادي (سرَ) ، و ($سر_{١}$) هي سرعة الجسم المادي ، بدلالة الجملة الساكنة •

وأثبت العالم فيزو في حينه وبالتجربة صحة علاقــة فرنل ، فأخذ أنبوبا يجري داخله تيار من الماء بسرعة نسبية (سر_{1}) وترك حزمــة ضوئية تخترق تيار الماء وتمكن بعــدها بواسطة حادثة التداخل من حساب سرعة الحزمة الضوئية بالنسبة الى جدران الانبوب .

وينتشر الضوء في الماء بسرعة $\text{سر}'$ ($\frac{\text{ث}}{\text{سر}'} = \text{ن}$) ويجري المــاء في الانبوب بسرعة سر_{1} . ووجد فيزو من دراسة ظاهرة التداخل ان سرعة الضوء بالنسبة لجدران الانبوب ينبغي أن تكون مساوية :

$$\text{سر} = \text{سر}' + \text{سر}_{1} \left(1 - \frac{1}{\text{ن}^{2}} \right)$$

وطابقت نتائجه التجريبية نتائج فرنل النظرية .

اذ انه لو بقي الاثير ساكنا لوجب بالاستناد الى علاقة تركيب السرع الكلاسيكية ان تكون سرعة الضوء بدلالة جدران الانبوب :

$$\text{سر} = \text{سر}' + \text{سر}_{1}$$

واذا كان عامل الانسحاب في الاثير هو $\frac{\text{سر}_{1}}{\text{ن}^{2}}$ كما فرضه فرنل كانت عندها سرعة الماء بالنسبة للوسط الاثيري هي $\text{سر}_{1} \left(1 - \frac{1}{\text{ن}^{2}} \right)$ وتــكون بالتالي سرعة الضوء المنتشر في الماء بدلالة الوسط الاثيري هي :

$$\text{سر} = \text{سر}' + \text{سر}_{1} \left(1 - \frac{1}{\text{ن}^{2}} \right)$$

فهنالك اذاً تطابق تام بين نتائج فيزو التجريبية ونتائج فرنل النظرية المستندة الى الميكانيك الكلاسيكي وفرضية انسحاب الوسط الاثيري .

غير ان ابنشتين وضع جانبا فرضية الاثير وأدت فرضياته الجديدة الى العلاقة الجديدة في تركيب السرع •

لنطبق هذه العلاقة على تجربة فيزو فارضين (سر_1) سرعة الماء (الجملة مَ) بدلالة جدران الانبوب (الجملة م) و (سرَ) سرعة الضوء في الماء (أو في الجملة مَ) •

$$\text{سر} = \frac{\text{سر}_1 + \text{سرَ}}{1 + \frac{\text{سرَ} \cdot \text{سر}_1}{\text{ث}^2}}$$

المقدار $\frac{\text{سرَ}\,\text{سر}_1}{\text{ث}^2}$ صغير جدا بدلالة الواحد ويمكننا بالتالي اعتبار المقـدار :

$$\frac{1}{1 + \frac{\text{سرَ}\,\text{سر}_1}{\text{ث}^2}} = 1 - \frac{\text{سرَ}\,\text{سر}_1}{\text{ث}^2}$$

وتصبح :

$$\text{سر} = (\text{سر}_1 + \text{سرَ}) \left(1 - \frac{\text{سرَ}\,\text{سر}_1}{\text{ث}^2}\right)$$

وبفك الاقواس :

$$\text{سر} = \text{سرَ} + \text{سر}_1 \left(1 - \frac{\text{سرَ}^2}{\text{ث}^2} + \frac{\text{سر}_1\,\text{سرَ}}{\text{ث}^2}\right)$$

يمكن أن نهمل المقدار $\frac{\text{سر}_1\,\text{سرَ}}{\text{ث}^2}$ أمام الواحد وأن نبدل $\frac{\text{ث}}{\text{سرَ}}$ بـ (ن) وعندها تصبح العلاقة أعلاه من الشكل :

$$س_ر = س_ر' + س_{ر_١}\left(١ - \frac{١}{ن^٢}\right)$$

وهي العلاقة التجريبية التي وجدها فيزو .

وتعتبر تجربة فيزو تحققا تجريبيا اساسيا لعلاقة تركيب السرع الجديدة التي نتجت عن تحويلات لورنتز وتشتق هذه الاخيرة بدورها من فرضيتي اينشتين .

* * *

الفصل السابع

الكتلة والطاقة

متى أردنا وصف ميكانيك الكون وصفا واقعيا لا بد لنا من الرجوع الى ثلاثة مقادير اعتبرتها المفاهيم الكلاسيكية مقادير طبيعية أساسية وهي الزمن والطول والكتلة .

وهذه المقادير الاساسية الثلاثة كانت بنظر الميكانيك الكلاسيكي مقادير ثابتة لا تدخل في تحويلات غاليله : فالحوادث المتواقتة تبقى متواقتة في كافة جمل المقارنة ، كذلك الطول المقاس في جملة مقارنة يحافظ على قياسه اذا ما رد الى جمل مقارنة أخرى متحركة بدلالة الجملة الاولى ، وأخيرا الكتلة أو عامل القصور (أو العطالة) تحافظ على قيمتها الثابتة في مختلف الجمل المقارنة .

ونشر اينشتين نظريته النسبية الخاصة ولم يتوخ منها الا تصحيح بعض المفاهيم الطبيعية في علمي الكهرباء والضوء وأثبتت هذه النظرية موجودية فعالة في هذين الفرعين . وعملت على تبسيط واختصار بنائهما النظري ، كما قصرت الفرضيات المتعددة والمبعثرة في هذين العلمين على فرضيتين اثنتين فقط .

وبعد النجاح المنقطع النظير الذي حققته النظرية الجديدة في دفع عجلة العلوم الكهرطيسية الى الامام ، تحول اينشتين نحو العلوم الميكانيكية محاولا دمجها في باب العلوم الكهرطيسية وجعل علم الميكانيك فرعا من العلوم الطبيعية .

فوجد نفسه مضطرا الى احداث بعض التحويلات في الميكانيك الكلاسيكي حتى يمكن تطبيق النظرية النسبية الخاصة عليه . وكانت التحويلات المقترحة تنصب فقط على القوانين الميكانيكية الخاصة بالحركات السريعة التي تبلغ فيها سرعة المادة قيمة قريبة من سرعة الضوء .

اعتمد الميكانيك الكلاسيكي على مبدأين أساسيين : مبدأ حفظ الكتلة ومفاده : اذا طرأت تحويلات على المادة المعزولة بقيت كتلة هذه المادة ثابتة .

ومبدأ حفظ الطاقة ومفاده : تبقى طاقة الجملة المادية المعزولة ثابتة . فالطاقة لا تخلق من العدم وكل ما يمكن ان يصيبها هو التحويل من شكل الى آخر من أشكال الطاقة المعروفة .

واختلفت نظرة اينشتين عن نظرة الكلاسيكيين للكتلة والطاقة وبحث في مقدار فيزيائي شعاعي جديد يعرف باسم كمية الحركة ويساوي جداء كتلة المادة (أو عطالتها) بسرعتها الشعاعية .

وقال اينشتين بثبات شعاع كمية الحركة في مختلف الجمل العطالية . واذا طبقنا تحويلات لورنتز على هذا المقدار كان جداء الكتلة بشعاع السرعة شعاعا ثابتا في مختلف الجمل العطالية .

وسبق للميكانيك الكلاسيكي أن بحث في الطاقة التي تختزنها المادة بفعل عطالتها ، وأطلق عليها اسم الطاقة الحركية وعرفها بكونها تساوي نصف جداء كتلة المادة المتحركة (أو عطالتها) بمربع سرعتها .

ونظرق اينشتين الى الطاقة المختزنة في المادة المتحركة وطبق عليها فرضيته الجديدة المتعلقة بثبات شعاع كمية الحركة فوجد ان الطاقة الحركية للمادة المتحركة تختلف قيمتها من جملة عطالية الى جملة عطالية أخرى تتحرك بدلالتها .

وحصل بعد المناقشة الرياضية على العلاقة التي تحسب بواسطتها الطاقة الحركية المخزونة في جسم مادي يتحرك بسرعة سر :

$$\text{طح} = \frac{\text{ك}_\text{.} \ \text{ث}^{٢}}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}} \qquad (١)$$

ترمز (طح) الى الطاقة الحركية ، (ث) الى سرعة الضوء في الخلاء (ك.) الى عطانة المادة وهي ساكنة و هـ = $\frac{\text{سر}}{\text{ث}}$.

وتزداد الطاقة الحركية بازدياد سرعة الجسم المتحرك ، وتبلغ قيمة غير محدودة عندما تبلغ سرعة الجسم سرعة الضوء .

ويقر الميكانيك الكلاسيكي بازدياد الطاقة الحركية للمادة بازدياد سرعتها ، غير ان هذه الطاقة ما كانت لتبلغ قيمة غير محدودة الا ببلوغ المادة سرعة غير محدودة .

كذلك قبل الميكانيك الكلاسيكي بانعدام الطاقة الحركية للمادة مع انعدام سرعتها بينما يظهر من العلاقة (١) ان الطاقة الحركية للمادة الساكنة لا تكون معدومة بل تساوي (ك. ث^{٢}) .

واذا عدنا للعلاقة (١) ونشرناها وفق قاعدة ثنائية الحد لنيوتن* حصلنا :

$$\frac{\text{ك}_\text{.} \ \text{ث}^{٢}}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}} = \text{ك}_\text{.} \ \text{ث}^{٢} \left(١ - \text{هـ}^{٢} \right)^{-\frac{١}{٢}} =$$

$$\star \ (١ + \text{ب})^{\text{ن}} = ١ + \text{ن ب} + \frac{\text{ن}(\text{ن}-١)}{١ \times ٢}\text{ب}^{٢} + \frac{\text{ن}(\text{ن}-١)(\text{ن}-٢)}{١ \times ٢ \times ٣}\text{ب}^{٣} \ldots$$

$$ك_ب \, ث^٢ \left(١ + \frac{١}{٢} هـ^٢ + \frac{٣}{٨} هـ^٤ + \ldots \right)$$

وتكتب أيضا بعد ابدال $هـ^٢ = \frac{سر^٢}{ث^٢}$ على الشكل :

$$\frac{ك_ب \, ث^٢}{\sqrt{١ - هـ^٢}} = ك_ب \, ث^٢ + ك_ب \frac{سر^٢}{٢} + \frac{٣}{٨} ك_ب \frac{سر^٤}{ث^٢} + \ldots$$

وفي الواقع العلمي يكون $\frac{سر^٢}{ث^٢}$ صغيرا جدا بدلالة الواحد ، فاذا اقتصرنا على الحدين الاول والثاني ، كانت عندها الطاقة الحركيـــة في الميكانيك النسبي تعطى بالعلاقة :

$$طح = ك_ب \, ث^٢ + \frac{١}{٢} ك_ب \, سر^٢ \qquad (٢)$$

وتقتصر العلاقة الكلاسيكية على حد واحد هو الحد $\frac{١}{٢} ك_ب \, سر^٢$

$$طح = \frac{١}{٢} ك_ب \, سر^٢ \qquad (٣)$$

والحد ($ك_ب \, ث^٢$) لا علاقة له بسرعة المادة وسوف نشرح مفهومه بعد قليل • وانتقل بعدها اينشتين الى مفهوم الكتلة وتوصل منه الى دمج مبدأي حفظ الكتلة وحفظ الطاقة في مبدأ واحد سماه مبدأ حفظ الطاقة •

وقادته تحويلات لورنتز الى علاقة أساسية بيّن بواسطتها تحول الكتلة الى طاقة والطاقة الى كتلة ، وخلص منها الى نتيجة هامـــة ظهر بموجبها ان الكتلة ليست سوى عامل يشير الى مقدار الطاقة وان المادة بكاملها ليست سوى تركيز للطاقة •

وقام اينشتين بالمناقشة التالية :

تتصور جسما ثابتا بدلالة جملة مقارنة عطالية (م َ) تتحرك هــذه الجملة حركة نسبية سرعتها (سر) بدلالة جملة عطالية ثانية (م) •

لنفرض أننا أعطينا هذا الجسم ، قدرا من الطاقة الاشعاعية مثلا ، ورغم هذه الطاقة الاضافية بقي الجسم ساكنا في جملته (م َ) •

لتكن (قد.) قيمة هــذه الطاقة كما تقدرها مــن الجملة (م َ) الساكنة بــدلالة الجسم ، فاذا نظرنا للجسم من الجملة (م) المتحركة بدلالته وطبقنا تحويلات لورنتز وجدنا عندها أن الطاقة المضافة لم تعد تقدر بالقيمة (قد.) وانما بالمقدار :

$$\frac{قد_{.}}{\sqrt{1 - هـ^{2}}}$$

والجسم المتحرك بدلالة (م) يملك نوعين من الطاقة : الطاقةالحركية

$$\frac{ك_{.}\ ث^{2}}{\sqrt{1 - هـ^{2}}}$$ والطاقة الاشعاعية المضافة $$\frac{قد_{.}}{\sqrt{1 - هـ^{2}}}$$ •

وتكون طاقته الكلية بدلالة الجملة (م) المتحركة بالنسبة اليه :

$$\frac{ك_{.}\ ث^{2} + قد_{.}}{\sqrt{1 - هـ^{2}}} = \frac{\left(ك_{.} + \frac{قد_{.}}{ث^{2}} \right) ث^{2}}{\sqrt{1 - هـ^{2}}}$$

والناظر من الجملة (م) الى الجسم المتحرك بدلالته لا يمكنه أن يقدر سوى الطاقة الحركية لهذا الجسم فهو يعتبر اذاً الطاقة الكلية أعلاه طاقة حركية لجسم كتلته القاصرة وهو ساكن ك. وفي هذه الحالــة

تقدر هذه الطاقة بالعلاقة $\frac{\text{كـ}_{٠}\ \text{ث}^{٢}}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}}$ وعليه يكون :

$$\frac{\text{كـ}_{٠}\ \text{ث}^{٢}}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}} = \frac{\left(\text{ك}_{٠} + \frac{\text{قد}_{٠}}{\text{ث}^{٢}}\right)\text{ث}^{٢}}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}}$$

ومنه :

$$\boxed{\text{كـ}_{٠} = \text{ك}_{٠} + \frac{\text{قد}_{٠}}{\text{ث}^{٢}}}$$

وتدعى ($\text{كـ}_{٠}$) بالعطالة الظاهرية (أو الكتلة الظاهرية) للجسم الساكن عندما يعطى طاقة اضافية ($\text{قد}_{٠}$) ويبقى بالرغم من ذلك ساكنا •

فالكتلة القاصرة لجسم معين ليست اذاً مقدارا فيزيائيا ثابتا ، بل تزداد الكتلة القاصرة للجسم الساكن عندما يكتسب هذا الجسم قدرا من الطاقة من أي نوع كانت ويبقى ساكنا بعد اكتسابها • والكتلة القاصرة الزائدة في هذه الحالة تساوي ناتج قسمة الطاقة المضافة على مربع سرعة الضوء •

فاذا بقيت طاقة الجسم الساكن ثابتة بقيت عطالته (او كتلته) ثابتة ايضا وفي الحالة التي تزداد أو تنقص فيها طاقة الجسم الساكن فان عطالته (او كتلته) تزداد أو تنقص •

فاذا رفعنا درجة حرارة جسم ساكن وجب عندها ان تزداد كتلته ومقدار الكتلة الزائدة يساوي ناتج قسمة الطاقة الحرارية المعطاة للجسم على مربع سرعة الضوء •

والكتلة القاصرة في هذه الحالة ليست اذاً سوى تعبير عن الطاقة

المخزونة في الجسم وتزداد هذه الكتلة بازدياد هذا المخزون كما تنقص بنقصانه والكتلة القاصرة لجسم بارد هي أصغر من الكتلة القاصرة لذات الجسم اذا كان حارا .

ومن البديهي اذاً أن يصبح حفظ الكتلة وحفظ الطاقة قانونا واحدا يمكن ان نسميه في النظرية النسبية بقانون حفظ الطاقة .

فاذا ما بقيت كتلة الجسم ثابتة بقيت طاقته المخزونة ثابتة والعكس صحيح . والطاقة الكلية المخزونة في جسم ساكن (هـ = صفر) ينبغي أن تساوي والحال هذه :

$$\text{قد} = \text{ك} \times \text{ث}^{2} \qquad (٤)$$

وترمز (قد) للطاقة المخزونة في الجسم الساكن مقاسة في جملته ، و (ك) لعطالته (أو الكتلة) محسوبة أيضا في هذه الجملة .

والجسم اذا كان ساكنا بدلالة جملة عطالية (مَ) لا بد وأن يكون متحركا بدلالة جملة عطالية ثانية (م) تتحرك بدلالة (مَ) بسرعة (سر) . فاذا رمزنا بـ (قد) للطاقة المخزونة في الجسم كما تحسب من الجملة (م) وبـ (ك) لكتلته كما تحسب أيضا في هـذه الجملة وطبقنا تحويلات لورنتز على الجملتين وجب عندها أن تحافظ القوانين الفيزيائية على أشكالها لدى الانتقال من جملة عطالية الى جملة عطالية ثانية . وفي هذه الحالة ينبغي ان تكون العلاقة بين طاقة الجسم (قد) وكتلته (ك) في الجملة (م) مماثلة للعلاقة (٤) بين طاقته وكتلته في الجملة (مَ) أي :

$$\text{قد} = \text{ك} \times \text{ث}^{2}$$

وعلاقة تحويل الطاقة من جملة الى أخرى هي :

$$\text{قد} = \frac{\text{قد}_{٠}}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}}$$

وبابدال قد و قد. بما يساويهما في الجملتين ينتج :

$$\text{ك} \times \text{ث}^{٢} = \frac{\text{ك}_{٠} \times \text{ث}^{٢}}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}}$$

ومنه :

$$\boxed{\text{ك} = \frac{\text{ك}_{٠}}{\sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}}}} \qquad (٥)$$

والعلاقة (٥) هي علاقة تحول الكتلة مع السرعة •

فاذا كانت عطالة الجسم الساكن (بدلالتنا) ك. • وتحرك هـذا الجسم (بدلالتنا أيضا) بسرعة (سر) ازدادت عندها عطالته «الظاهرية» ويمكن تعيين قيمتها الجديدة من العلاقة (٥) •

وكل من درس قواعد علم الجبر يمكن أن يدرك انه كلما كانت (سر) صغيرة كلما كان الفرق بين (ك) و (ك.) صغيرا جدا •

ولكن عندما تصل (سر) الى قيمة قريبة من سرعة الضوء يصبح في هذه الحالة الفارق بـين الكتلتين كبيرا جدا ، ويصـل في الكبر الى ما لا نهاية عندما تصل سرعة الجسم الى سرعة الضوء • وكتلة الجسم أو عطالته تدل على مقاومته للحركة فكلما ازدادت كتلة الجسم ازدادت معها مقاومته للحركة أو للتسارع واذا أصبحت سرعته مساوية لسرعـة الضوء أصبحت معها مقاومته للتسارع لا متناهية في الكبر فلا توجد عندها قوة طبيعية قادرة على زيادة سرعته وينتج عن ذلك أن أي جسم لا يمكنه ان تصل سرعته الى سرعة الضوء أو تتعداها •

وتمكن العلماء من تحقيق مبدأ ازدياد الكتلة مع السرعة واستطاعوا اجراء تجارب بينت صحة هذا القانون وسوف نأتي على شرحها بالتفصيل في الفصل القادم .

وعمم اينشتين فكرة التعادل بين العطالة والطاقة على المفاهيم الكهرطيسية وقال بوجوب وجود كتلة أو عطالة كهرطيسية للطاقة الكهرطيسية . وتحسب هذه الكتلة من العلاقة :

$$ك = \frac{\text{الطاقة}}{ث^{٢}}$$

ولما كان لكل موجة كهرطيسية طاقة تعطينا قيمتها معادلات مكسويل وجب اذاً أن يكون للموجة الكهرطيسية كتلة عاطلة أيضا .

وعاد اينشتين الى أبحاث العالم بلانك (Plank) المتعلقة بانتقال الطاقة . وكان هذا العالم قد بيَّن بأن الطاقة لا يمكن أن تنتقل بشكل مستمر بل يكون انتقالها على دفعات متقطعة سميت كل دفعة بذرة الطاقة وكانت ذرة الطاقة هذه مقدارا ثابتا في كل موجة أو اشعاعة . فأطلق اينشتين على هذه الذرات اسم الفوتون (Photon) أو الكموم وحسب بلانك ذرة الطاقة في كل اشعاعة فوجدها تساوي حاصل ضرب عدد ثابت (اطلق عليه فيما بعد اسم ثابت بلانك) بتواتر الموجة .

الفوتون = ثابت بلانك × تواتر الموجة

فالفوتون البنفسجي في جملة معينة يساوي ضعف الفوتون الاحمر في هذه الجملة . وتناول اينشتين الفوتون وقال بوجوب تمييز الفوتونات عن بعضها بكتلتها أو عطالتها .

فالفوتون هو مقدار من الطاقة كتلته ك :

$$ك = \frac{\text{الفوتون}}{ث^{٢}}$$

وتمكن عندها من حساب كتلة الفوتون بمجرد معرفة تواتره :

$$ك = \frac{\text{الفوتون}}{ث^2} = \frac{\text{ثابت بلانك} \times \text{تواتر الموجة}}{ث^2}$$

وتتناسب كتلة الفوتون طردا مع تواتره •

وكتلة الفوتون البنفسجي في جملة معينة تساوي ضعف كتلة الفوتون الاحمر في هذه الجملة •

وساعدت المفاهيم الجديدة في اجلاء بعض غوامض البنية الضوئية • كان العالم نيوتن يعتبر الضوء جزئيات مادية تصدر عن المنبع الضوئي ، ثم أتى هويجنز فاعتبره موجات تنتشر في الوسط الاثيري • والآن وبعد عرض المفاهيم النسبية عاد بنا اينشتين من جديد الى أفكار شبيهة بأفكار نيوتن • فالاشعاعات الضوئية أصبحت بعرف اينشتين ذرات طاقة تتصف بعطالة (أو كتلة) ، والمادة ليست الا تعبيرا حسيا للطاقة تشعر بها حواسنا كما تشعر باللون والرائحة واللمس • فالاشعاعات الضوئية هي اذا عبارة عن ذرات مادية تحدد خواصها الطاقة المخزونة في كل ذرة من هذه الذرات وتقاس هذه الطاقة بامثالات عددية تعرف بالكتلة العاطلة • وقد أيدت النتائج التجريبية أفكار اينشتين الجديدة ، وكانت تجارب كومبتن (Compton) في الفعل الكهرضوئي (effet photoélectrique) خير دليل على صحتها •

ولعبت المعادلة :

$$قد = ك \times ث^2$$

دورا خطيرا في انتاج القنبلة الذرية ، وأصبحت معادلة معروفة لدى الجمهور •

وحلت المعادلة اعلاه مشاكل عديدة من مشاكل العلوم الطبيعية فهي تعلل كيف ان المواد المشعة مثل الراديوم واليورانيوم ، تستطيع أن تطلق

جزئيات بسرع كبيرة وتعلل أيضا كيف ان الشمس وجميع النجـوم تستطيع الاستمرار في اشعاع الضوء والحرارة لبلايين السنين •

وقبل ظهور النظرية النسبية صور العلماء الكون بكونه اناء يحتوي عنصرين اساسيين : المادة والطاقة • واعتبروا المادة كأنها شيء خامـل ملموس يمكن تمييزه بعامل يسمى الكتلة ، أما الطاقة فقد اعتبروها شيئا نشيطا غير منظور وبدون كتلة •

ولكن اينشتين صحح هذه المفاهيم وبيّن التعادل بين الطاقةوالكتلة• فالخاصية التي تسميها كتلة ما هي الا طاقة مركزة ، وبمعنى آخر فـان المادة هي طاقة والطاقة هي مادة واحداهما هي حالة وقتية للاخرى •

فالمادة والطاقة يمكن تحويل احداهما الى الاخرى ؛ فاذا ما اطلقت المادة كتلتها وسارت بسرعة الضوء فاننا نسميها عندئذ اشعاعا أو طاقة والعكس صحيح أي اذا خمدت الطاقة وأصبحت غير فعالة وأدركنا كتلتها فاننا نسميها عندئذ مادة •

وتمكن الانسان من تحويل المادة الى طاقة في القنبلة الذرية ، وحول الطاقة الى مادة في غرفة ويلسون (Chambre de Wilson) حيث أمكن مشاهدة تحول الفوتونات (الطاقـة) الى كهارب موجبـة (Positron) وكهارب سالبة (électron) .

* * *

الفصل الثامن

التحقيقات التجريبية للنظرية النسبية الخاصة

كانت التحقيقات التجريبية للنظرية النسبية المختصرة من يوم اعلانها حتى اليوم لا تعد ولا تحصى . ففي كل يوم تنتشر الابحاث المؤيدة لهذه النظرية . وانصبت غالبية التحقيقات التجريبية على علاقات تحول الزمن والطول والكتلة . وكانت النتائج التجريبية دعامة قوية لنظرية اينشتين الجديدة .

١ ــ علاقة تركيب السرع :

أورد اينشتين علاقة جديدة لتركيب السرع :

$$\text{س} = \frac{\text{س}_1 + \text{س}_2}{1 + \frac{\text{س}_1\text{س}_2}{\text{ن}^2}}$$

وبينا في الفصل السادس كيف يمكن الوصول الى النتائج التجريبية التي حصل عليها العالم فيزو بتطبيق العلاقة الجديدة .

وبين عامي ١٩١٤ و ١٩١٥ قام العالم زيمن (Zeeman) بسلسلة تجارب دقيقة أعاد بواسطتها تجارب فيزو .

ويمكن تلخيص نتائج التجارب في الجدول التالي :

طول موجة الضوء	نتائج زيمن التجريبية	نتائج فرنل النظرية	نتائج اينشتين النظرية
٠,٤٥٠ ميكرون	٠,٤٦٥	٠,٤٤٣	٠,٤٦٤
٠,٤٥٨ ميكرون	٠,٤٦٣	٠,٤٤٢	٠,٤٦٣
٠,٥٤٦ ميكرون	٠,٤٥١	٠,٤٣٩	٠,٤٥٤
٠,٦٨٧ ميكرون	٠,٤٤٥	٠,٤٣٥	٠,٤٤٧

ويبدو من الجدول أعلاه التطابق التام (في حدود خطأ التجريب) بين النتائج التجريبية التي حصل عليها زيمن والنتائج النظرية المشتقة من علاقة اينشتين لتركيب السرع •

٢ ــ تمدد الازمنة :

تنبأت النظرية النسبية بتأخر الساعات المتحركة ، والتحقيق التجريبي المباشر لهذه الظاهرة شبه مستحيل ، اذ ينبغي ان تكون سرعة الساعة المتحركة قريبة جدا من سرعة الضوء حتى تتمكن من قياس فروقات زمنية محسوسة •

لذا بقيت هذه الظاهرة بدون تحقيق حتى عام ١٩٣٨ • ففي ذلك العام قام عالم فيزيائي اسمه ايفز (Ives) بتجربة بينت صحة فكرة تمدد الازمنة •

كان ايفز من ألد أعداء النظرية النسبية فجعلته النتائج التي حصل عليها من أكبر أنصارها •

ملأ انبوبا زجاجيا بذرات غاز الهيدروجين المشع وسلط على هذه الذرات مجالا كهربائيا شديدا للغاية ، فاكتسبت الذرات سرعة كانت

تساوي ٢٠٠٠ كيلومتر/ثانية أي ما يعادل ٦ بالالف من سرعة الضوء ورغم صغر النسبة $\frac{\text{سَ}}{\text{ث}}$ = هـ فقد سمحت التجربة بالوصول الى نتائج مدهشة .

تعتبر الذرة المشعة ساعة زمنية فائقة الدقة فهي تشع ضوءا تواتره ثابت وله طول موجة محددة يمكن قياسها بدقة فائقة بواسطة المطياف .

قارن ايفز الضوء الذي تبعث به ذرات الهدروجين المتحركة ، بالضوء المنبعث عنها وهي ساكنة (بدلالة المجرب) فدله المطياف على أن الخطوط الطيفية الموافقة للذرات المتحركة تكون أقرب للمنطقة الحمراء من الخطوط الطيفية الموافقة للذرات الساكنة ، ويعني ذلك ان الموجةالضوئية المنبعثة عن الذرة المشعة المتحركة أطول من الموجة الضوئية المنبعثة عن الذرة المشعة الساكنة . وطول الموجة كما نعلم يتناسب طردا مع دور الاهتزاز أي مع الزمن اللازم للاهتزازة الكاملة .

وعليه تكون واحدة الزمن في الجملة المتحركة أكبر من واحدة الزمن في الجملة الساكنة . وتحقق ايفز تجريبيا من العلاقة النظرية :

$$\text{زَ} = \frac{\text{ز}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^{2}}}$$

ويأمل علماء اليوم بأن يتوصلوا للتحقق من ظاهرة تمدد الازمنة بوضع ساعات ذرية داخل الاقمار الصناعية التي تنطلق من الارض وتدور في الفضاء فترة طويلة من الزمن ثم تعود بعدها الى مكان اطلاقها .

وبذلك يمكن مقارنة الساعة الذرية الفضائية بعد عودتها مع ساعة ذرية مماثلة بقيت ساكنة على سطح الارض .

٣ ــ تغير الكتلة :

وجد اينشتين ان العلاقة بين كتلة الجسم المتحرك وكتلته وهو ساكن ينبغي أن تكون من الشكل :

$$\text{ك} = \frac{\text{ك}_{٠}}{\sqrt{\text{١} - \text{هـ}^{\text{٢}}}}$$

وتمكن العلماء من التحقق من ظاهرة ازدياد الكتلة في انابيب كروكس (Crookes)

ذكرنا في حينه كيف استطاع العالـم طمسن (Thompson) حساب النسبة بين كتلة الكهروب وشحنته .

وبحث اينشتين في تحولات الشحنة الكهربائية للكهروب فوجدها ثابتة عالمية لا تؤثر عليها حركة الكهروب أو حركة الجملة التي يتحرك الكهروب بدلالتها .

فشحنة الكهروب تبقى ثابتة بينما ينبغي ان تتحول كتلته مع سرعته وبالتالي ينبغي أن تتحول نسبة كتلة الكهروب الى شحنته مع سرعـة الكهروب . فاذا صحت هذه الظاهرة تجريبيا كان في تحقيقها دعامة لتنبؤات اينشتين في تحول الكتلة .

وفي عام ١٩٣٥ استطاع العالم الفيزيائي غي (Guye) مشاهدة تحول النسبـة المذكورة .

فقد تمكن هذا العالم من اكساب الاشعة المهبطية سرعة قـدرها ٢١٠٠٠٠ كيلومتر/ثانية فوجد عندها بالقياس ان نسبة شحنة الكهروب الى الكتلة تنقص بمقدار ٤٠٪ من قيمتها في حالة كون سرعـة الاشعة صغيرة نسبيا .

وكانت هذه النتيجة التجريبية مطابقة تماما للعلاقة النظرية في تحول الكتلة . وكان العالم بوكرر (Bucherer) عام ١٩٠٩ قد تحقق تجريبيا ايضا من علاقة تحول الكتل وذلك أثناء دراسته لطبيعة الاشعاعات المنبعثة من الراديوم المشع .

وجد العالم ان الراديوم المشع يبعث بثلاثة أنواع من الاشعاعات : اشعاعات الفا (أ) الموجبة ، واشعاعات بيتا (ب) السالبة ، واشعاعات غما (حـ) المعتدلة .

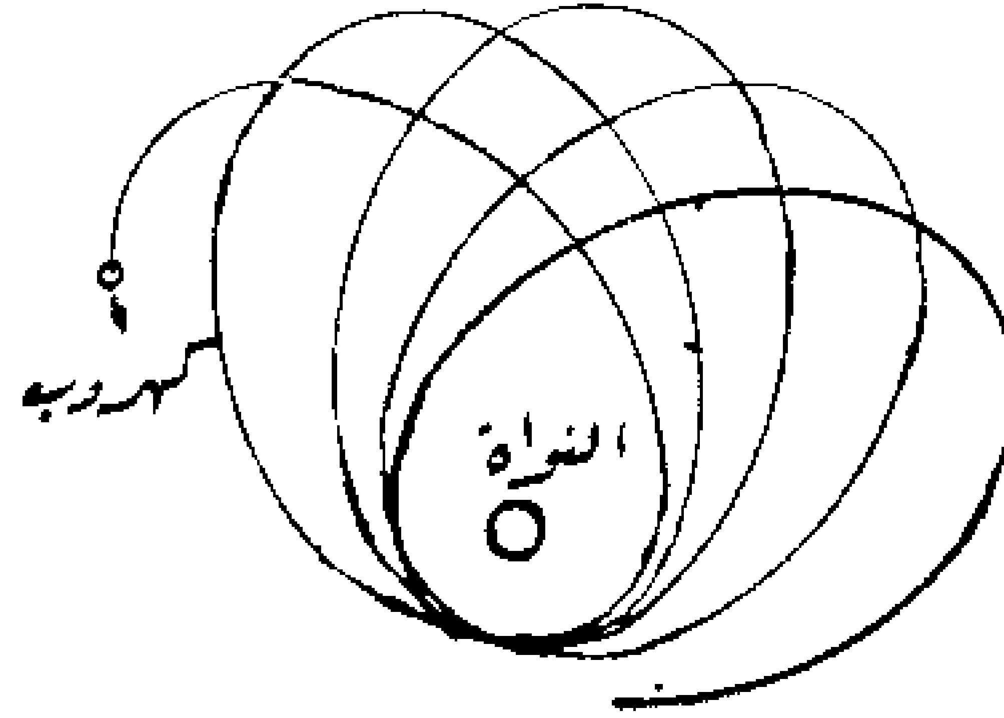
ورغب في تحديد خواص هذه الاشعاعات فتبين له ان اشعاعات الفا (أ) تتصف بكتل متساوية ، تساوي كتل نوى عنصر الهيليوم . بينما وجد أن كتل الاشعاعات بيتا (ب) ليست متساوية ، فبينما كانت كتل بعضها مساوية تقريبا لكتلة الكهروب وجد بعضها الآخر يفوق بكتلته أضعاف المرات كتلة الكهروب . ولكنه لاحظ ان الكتل الكبيرة توافق اشعاعات فائقة السرعة فطبق عليها علاقة تحول الكتل وحصل بذلك على قيمة تساوي كتل الاشعاعات (بيتا) عندما تكون سرعتها صغيرة ووجد ان الكتلة المشتركة تساوي كتلة الكهروب .

وساهمت علاقة اينشتين الخاصة بتحول الكتلة مع السرعة في تصحيح نظرية البنية الذرية للمادة تلك النظرية التي وضعها العالم الفيزيائي بور (Bohr) عام ١٩١٣ .

فرض بور الذرة المادية مؤلفة من نواة موجبة تدور في فلكها الكهارب السالبة على مدارات دائرية تقع النواة في مركزها المشترك . وادخل بعدها العالم سومرفيلد (Sommerfield) بعض التصحيحات على نظرية بور واقترح بأن تكون مدارات الكهارب قطوعا ناقصية تقع النواة في أحد محرقيها .

واذا دار الكهروب على مدار ناقصي تقع النواة في أحد محرقيه

لا يمكن أن تبقى سرعته ثابتة وتتحول قيمة هذه السرعة من نقطة الى أخرى على المدار الناقصي وبالاستناد الى نظرية اينشتين ينبغي أن تتحول كتلة الكهروب من نقطة الى أخرى على مداره • وناقش سومرفيلد رياضيا هذه الظاهرة وبيّن أن تحول كتلة الكهروب سوف يرغمه بالتالي على تغيير مداره . فهو ينبغي أن يدور اذاً على عدد من القطوع الناقصية تشترك في نقطة واحدة تسمى حضيضا وتقع النواة في محرقها المشترك ؛ ويقوم محور هذه القطوع بحركة أطلق عليها اسم تأرجح المحور (Précession) (شكل ٤٩) •



شكل ٤٩

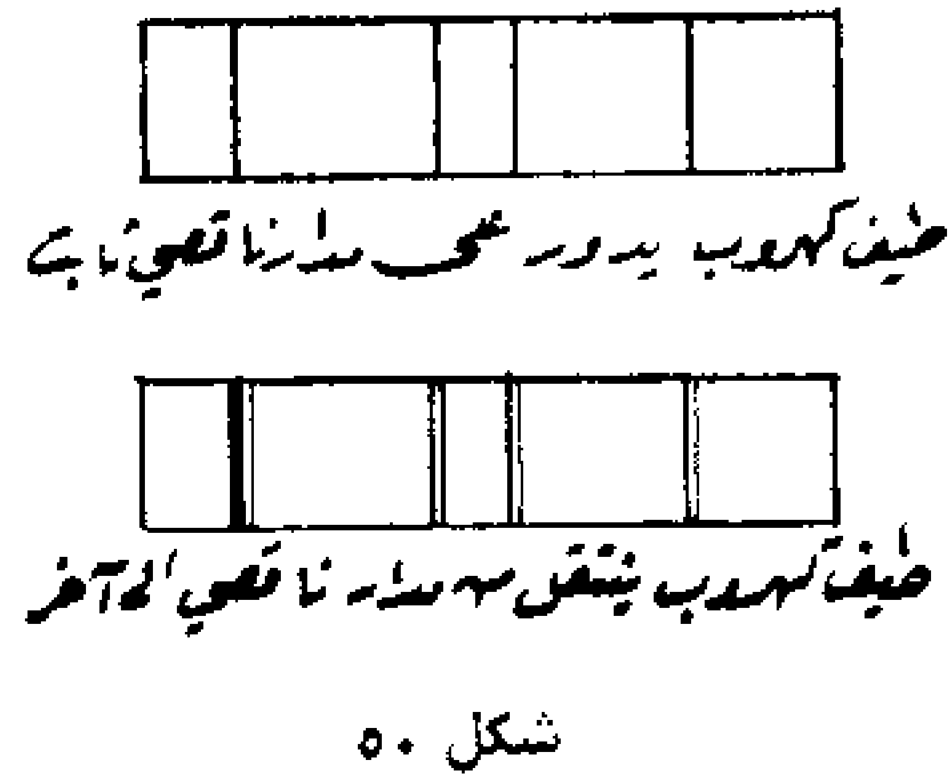
فاذا تمكنا من ملاحظة حركة التأرجح هذه كان في ذلك اثبات لتحول الكتلة مع السرعة • ومن المعلوم انه يستحيل رؤية الكهروب حتى بأدق المجاهر الالكترونية غير ان هنالك طرقا تجريبية تمكننا بصورة غير مباشرة من تعيين المدار الذي يتحرك عليه الكهروب •

فلكل مدار طاقة خاصة به ويوافق كل طاقة كما بينا تواتر اهتزاز خاص بها ويوافق كل تواتر خط طيفي يرتسم على لوحة المطياف •

فاذا غير الكهروب مداره تحولت طاقته وبعث بالطاقة المكتسبة على شكل موجة كهرطيسية يحدد تواترها مقدار تحول الطاقة ويجعلنا المطياف نرى الخط الطيفي الموافق لها •

فاذا دار الكهروب على قطع ناقص واحد ونثرنا المادة الحاوية عليه في شعلة بيضاء واسقطنا الضوء على فتحة دخول المطياف ارتسم علـى لوحته طيف امتصاص خاص بالمادة ، وفي هذه الحالة ينبغي أن تكون الخطوط الطيفية رفيعة جدا .

أما اذا تأرجح محور القطع وجب عندها أن تنشطر الخطوط الرفيعة الى خطين أو أكثر قريبة من بعضها قربا كبيرا (شكل ٥٠) .



شكل ٥٠

واكتشف العالم الفيزيائي باشن (Pashen) عام ١٩١٦ أثناء دراسته طيف الهيليوم انشطار الخطوط الطيفية ، وكان في هذا الاكتشاف دعم جديد للنظرية النسبية .

وساعدت المسرعات (Accélérteurs) الذرية في التحقق من ظاهرة ازدياد الكتلة مع السرعة .

فاعطيت البروتونات (Protons) سرعة ٢٨٥٠٠٠ كم/ثا أي مايقارب ٩٥٪ من سرعة الضوء ، ودلت عندها القياسات أن كتلة البروتون المسرع أصبحت ثلاثة أمثال قيمتها الاصلية وهي نتيجة تجريبية توافق العلاقة النظرية .

واعطيت الكهارب سرعة تساوي ٠,٩٩٩٩٩٩٩ من سرعة الضـــوء وقيست عندها كتلة الكهروب فوجدت مساوية ٩٠٠ مرة كتلته الاصلية وهي قيمة تطابق النتائج النظرية .

وفي السنوات الاخيرة اكتشف العلماء اشعاعات فائقة النفوذ سميت بالاشعة الكونية (rayons cosmiques) وقيست سرعتها بواسطة غرفة ويلسون فوجدت قريبة جدا من سرعة الضوء دون أن تتعداها . وتبين للعلماء ان هذه الاشعاعات تحمل طاقة هائلة لم تتمكن الصناعة الحديثة من توليدها ، فهي بامكانها أن تخترق حواجز سميكة من الرصاص ، وتحوي هذه الاشعاعات فيما تحويه الكهارب السريعة جدا . وتبين بالقياس أن كتلة كهروب من هذه الكهارب تساوي ٤٠ ٠٠٠ مرة كتلة الكهروب الساكن .

واعتبرت هذه النتائج دعامة جديدة للنظرية النسبية اذ أن الفارق كبيرة بين الواحد وال ٤٠ ٠٠٠ ولا يمكن التغاضي بعد ذلك عن أخطاء المفاهيم الكلاسيكية .

٤ ـ عطالة الطاقة والتعادل بين الكتلة والطاقة :

تنص نظرية بور في البنية الذرية للمادة على ان نواة الذرة مؤلفة من بروتونات (Protons) موجبة ونوترونات (Neutrons) معتدلة ، ودلت الدراسات الكيميائية على أن عدد البروتونات في النواة يزداد بازدياد الوزن الذري للمادة ، وتحوي نواة الهيدروجين وهو أخف العناصر على بروتون واحد بينما تحوي نواة الاورانيوم وهو من أثقلها على ٩٢ بروتون .

والمعروف عن أبعاد النواة أنها صغيرة جدا ، فالبروتونات الداخلة في تركيبها تكون قريبة جدا من بعضها ، واذا عدنا الى قانون كولون في الكهربائية الساكنة لوجب ان تنشأ بين هذه البروتونات قوى تنافر كهربائية هائلة تدفع بالبروتونات بعيدا عن بعضها مما قد يؤدي حتما الى

انفلاق النواة وبعثرة محتوياتها ، غير أن شيئا من هذا لم يحدث ويعلل عدم حدوثه بوجود طاقة هائلة تسمى بطاقـة الربط تربط بين أجزاء النواة وتمنعهامن الانفلاق ؛ ويمكن التحقق من وجود هذه الطاقةوقياسها بالاخذ بمفاهيم اينشتين وما يتعلق منها بالتعادل بين الطاقة والكتلة .

فاذا عدنا الى مبدأ حفظ الطاقة الذي ينص على عدم خلق الطاقة من العدم أو افنائها أمكننا عندها تعيين طاقة الربط في نواة الذرة .

وفي عام ١٩٣٢ قام العالمان كوكروفت وولطن (Cockroft et Walton) بالتجربة التالية :

قذفا نواة عنصر الليتيوم ببروتون سريع وسبب اصطدام البروتون بالنواة انفلاق هذه النواة الى نواتي هليوم ، ونتج عن الانفلاق قـدر محسوس من الطاقة . وتمثل عملية القذف بالعلاقة الكيميائية التالية :

نواة ليتيوم + بروتون ← نواة هليوم + نواة هليوم + طاقة

ويقول العالم لافوازييه (Lavoisir) : في كل تفاعل كيميائي يكون مجموع الكتل الداخلة في التفاعل مساويا لمجموع الكتل الناتجة عـن هذا التفاعل .

وحسب العالمان مجموع كتلتي نواة الليتيوم والبروتون ومجموع كتلتي نواتي الهليوم فوجدا أن المجموع الثاني لا يساوي المجموع الاول انما هو أصغر منه .

عندها عادا وطبقا علاقة التعادل بين الطاقة والكتلة، وحسبا بواسطتها كتلة البروتون المتحرك وكتلة كل من نواتي الهليوم المتحركتين والكتلة المعادلة للطاقة الناتجة عن الانفلاق ، فوجدا عندها تساوي مجموع الكتل في طرفي العلاقة .

وتحققت بهذه التجربة نبوءة اينشتين في تعادل الكتلة والطاقة وكانت الطاقة المتحررة من تلاشي كتلة معينة تعطي بالعلاقة :

قـذ = ك × ث²

وأثارت نتيجة تجربة كوكروفت في التحقق من صحة قانون التعادل بين الطاقة والكتلة ، ضجة عارمة في الاوساط العلمية التي وجدت فيها منبعا جديدا في الحصول على الطاقة التي ما برح الانسان منذ الحضارات الاولى ينقب عن منابع جديدة لها كي يدفع عجلة حضارته بقفزات كبيرة نحو التقدم والازدهار •

وتتالت التحريات العلمية في هذا الخصوص في بلاد اوربا وأمريكا قاطبة ، وأجريت تفاعلات ذرية مماثلة لتفاعل كوكروفت في غالبية مخابر الجامعات ومراكز البحوث ، ووجد بعد لأي أن قذف النواة بالنوترون عملية أسهل بكثير من قذفها بالبروتون لان النوترون المعتدل بامكانـه الاقتراب من النواة الموجبة بسهولة بينما تدفع النواة الموجبة البروتونات الموجبة المقتربة منها بقوى تنافر قد تمنعها من الوصول اليها •

كما وجد العلماء أن هنالك بعض العناصر الكيميائية تتقبـل القذف والانفلاق بسهولة وتنشر لدى انفلاقها قدرا عظيما من الطاقة ، وكان معدن اليورانيوم هو أحد هذه العناصر •

واستعمل اليورانيوم في القنبلة الذرية وكانت الطاقة المنتشرة عن الانفلاق المتسلسل عظيمة للغاية •

واكتشف بعدها العلماء ظاهرة ذرية جديدة كانت محققة هي أيضا لنبوءة التعادل بين الطاقة والكتلة •

عندما تضغط أربع نوى هدروجين بضغط شديد وفي وسط حرارته

مرتفعة جدا تلتحم النوى الاربعة وينتج عن التحامها نواة هليوم واحدة وقدر كبير من الطاقة يفوق بكثير الطاقة الناشئة عن انفلاق النواة .

واذا جمعنا كتل نوى الهدرجين الاربعة لكان ناتج جمعها أكبر من كتلة نواة الهليوم الناتجة .

ولكن اذا أضفنا لمجموع كتل الهدروجين الكتلة المعادلة للطاقة المبذولة في ضغطها واذا أضفنا لكتلة الهليوم كتلة الطاقة الناتجة عن الالتحام لكان المجموع الاول مساويا للمجموع الثاني .

وتحدث ظاهرة الالتحام هذه في الشمس والنجوم ، وتعلل اشعاع الشمس والنجوم للطاقة بلايين السنين دون ان تفقد قدرا محسوسا من كتلتها .

تكون درجة الحرارة مرتفعة في نواة الشمس نتيجة الضغط الهائل للمادة وفي هذه الدرجة تتأين الذرات وتفقد كهاربها ، وبتأثير هذه الحرارة والضغط تلتحم نوى عنصر الهيدروجين الموجودة في مركز الشمس وينشأ عن التحامها نوى الهليوم وطاقة عظيمة ترفع درجة حرارة الشمس الى ملايين الدرجات فتشع هذا النور الساطع الذي نتلقاه ولا حياة لنا بدونه .

وتمكن علماء اليوم من احداث الانفلاق والالتحام في حيز مغلق واحد ، ونتج عن العمليتين طاقة هائلة استخدمت للتدمير في القنبلة الهيدروجينية .

الفصل التاسع

المتصل الزماني ـ المكاني ذو الابعاد الاربعة

يقول اينشتين في كتابه النسبية : ان غير الضالعين بالعلوم الرياضية يكتنفهم الغموض عندما يسمعون عن « الابعاد الاربعة » ويعتقدون ان في ذلك ضربا من الخيال ؛ وعلى الرغم من هذا فان القول بأن العالم الذي نعيش فيه هو عبارة عن عالم متصل له أربعة أبعاد هو قول واضح صريح •

الفضاء هو متصل ذو ثلاثة أبعاد ونعني بذلك أنه بامكاننا تعيين وضع نقطة بواسطة ثلاثة أعداد نسميها احداثيات النقطة ؛ وتكون عندها النقطة مردودة الى جملة مقارنة هي عبارة عن ثلاثية فراغية (س ع ص)• وتحدد الاحداثيات الثلاثة س و ع و ص ، مكان النقطة الثابتة ، ويوجد بجوار النقطة المعتبرة عدد غير محدود من النقط تكون قريبة من النقطة المفروضة كما نشاء • وتحدد هذه النقط باحداثيات س١ و ع١ و ص١ تكون قيمتها قريبة قربا لا متناهيا من القيم س و ع و ص • نعبر عن ذلك بقولنا : « الفضاء متصل » • ولما كانت ثلاث احداثيات كافية لتحديد الفضاء المدروس صح عندها القول بأن الفضاء المعتبر متصل ذو ثلاثة أبعاد •

فشريط سكة الحديد هو متصل ذو بعد وحيد ؛ وتكفي احداثية واحدة لتحديد وضع القطار على هذا الشريط • ويمر القطار على شريطه بأوضاع تحددها احداثية واحدة تتحول قيمتها بشكل مستمر •

ويحتاج قبطان الباخرة في تحديـد موقعه على سطـح البحر الى احداثيتين ، فسطح البحر هو عبارة عن متصل ذي بعدين تحدد أوضاع نقاطه بتقاطع خط طول مع خط عرض •

ويقود الطيار طائرته في متصل ذي ثلاثة أبعاد ويحدد وضع الطائرة بثلاثة احداثيات : خط الطول وخط العرض والارتفاع عن سطح البحر •

ولكن اذا ترك القطار على شريطه وسارت الباخرة على سطح البحر وحلقت الطائرة في الجو ، احتجنا عندها الى تبيان كيفية تغير الموضع بتغير الزمن •

وتحتاج عندها دراسة حركة القطار الى احداثيتين : البعد عن محطة معينة والزمن • وتحتاج دراسة حركة الباخرة الى ثلاثة احداثيات : خط الطول وخط العرض والزمن • وتحتاج دراسة تحليق الطائرة الى أربع احداثيات خط الطول وخط العرض والارتفاع عن سطح البحر والزمن •

وقد أثبتت التجارب الفيزيائية المتعددة انه من المستحيل تحديد حركتنا بدلالة الاثير الساكن أو الجملة المطلقة ، فكأن المكان المطلق (الاثير الساكن أو الجملة المطلقة) يتوارى عنا ، واذا كان موجودا حقا فلا شيء يدعوه كي يتوارى فهو اذاً غير موجود على الاطـلاق • كذلك دلت التجارب العديدة ان الزمن المطلق غير موجود ايضا والحوادث المتواقتة في جملة مقارنة معينة يمكنها أن لا تكون متواقتة في جملة ثانية ، فلا يصح اذاً القول بوجود زمن متماثل في كافة الجمل والتواقت نسبي اذاً • فماذا ينبغي أن نضع مكان الجملة المطلقة والزمن المطلق ؟ ينبغي ان نصطنع مفهوما جديدا وبسيطا يمكننا استخلاصه من تجاربنا اليومية مفهوما لم يتضح فحواه ولم تظهر نتائجه الباهرة الا بعد أن شرح اسسه العالم الرياضي مينكوسكي (Minkowski) استاذ اينشتين عام ١٩٠٩
يقول مينكوسكي : لا يمكننا تعريف قياس طول الشيء الا متى

عينا لحظة قياس هذا الطول • كذلك لا يمكننا قياس فترة زمنية الا متى عينا المكان الذي يتم فيه هذا القياس • وخلص من ذلك الى أن : المكان والزمان هما شيئان امتزجا امتزاجا وثيقا وطبيعيا بحيث لا يمكننا البتة فصلهما عن بعضهما •

ولما كان المكان المطلق غير موجود والزمان المطلق غير موجود ايضا ، يفرض علينا عندها منطق الاشياء اعتبار مزيج الاثنين حقيقة طبيعية واقعية نسميها بالزمان ـ المكان أو « بالعالم » (Univers) ومفهوم العالم هو مفهوم بالغ الاهمية ينبغي أن نألفه وأن تؤمن بأننا لا نعيش في فضاء متصل ذي ثلاثة أبعاد نضيف اليه الساعات لقياس الزمن ، وانما نعيش فعلا في « عالم » متصل ذي أبعاد أربعة •

ويمكن ايضاح ما تقدم بالتشبيه التالي :

نعتبر الفضاء الاعتيادي ذا الابعاد الثلاثة ، وتتخيل في هذا الفضاء « أحياء ذكية » ذات بعدين فقط ، كأن تتخيل مثلا حشرات تعيش في مستوي أفقي وتجهل تماما البعد الثالث •

فاذا أرادت هذه الكائنات العاقلة صياغة قوانين الكون لما حصلت بالتأكيد على قوانين مماثلة لقوانيننا •

فلو أنها تناولت مثلا دراسة نمو الاعشاب المحيطة بها لظهرت لها هذه الاعشاب على شكل ظلال ترتسم على المستوي الافقي الذي تعيش عليه (الارض) ، وتشاهد هذه الكائنات ان الاعشاب تنمو وهي تدور ، ويعود ذلك لكون الظل يدور بانتقال الشمس بالنسبة للارض ، وتخلق هذه الكائنات « علم نبات » خاص بها له قيمته بالنسبة لحياتها ، تختلف قوانينه شكلا ونوعا وموضوعا عن قوانيننا نحن معشر البشر الذين نحيا في فضاء تحدده الابعاد الثلاثة •

ونعبر عما سبق بقولنا : ان تلك الحشرات اعتبرت مسقط الحقيقة على مستوي بمثابة الحقيقة ذاتها .

ولن يكون للعلوم التي تضعها هذه الكائنات فائدة عملية الا اذا بقي مستوي الاسقاط ثابتا ، أو بمعنى آخر اذا بقيت الشمس ثابتة بدلالة الارض طيلة فترة حياة الحشرة وذلك حتى تبقى الظلال ثابتة لا تدور بالنسبة اليها ، وعندها فقط وبحدود معقولة يمكننا استنباط بعض الفائدة من علم النبات الذي وضعته هذه الكائنات المسطحة .

وبالرجوع الى آراء مينكوسكي نجد أننا نحن معشر البشر لسنا في وضع نحسد عليه وضع يتميز عن وضع هذه الكائنات المسكينة . نحن نعيش في فضاء ذي ثلاثة أبعاد وضعنا قوانينه الفيزيائية بعد جهد ولأي . والعلوم التي أسسناها والتي هي ثمرة أجيال وأجيال ليست هي حتى صورة للحقيقة وانما منظورا (Perspective) خاصا تحدد معالمه ظلال اسقطت على الجمل المقارنة الفراغية التي نحيا فيها وتعاني جمل الاسقاط هذه تحولات عديدة على مرور حياتنا . فهي تشبه بحركتها حركة مستوي الاسقاط عند الكائنات المسطحة نتيجة لحركة الشمس بالنسبة للارض . ولكن لحسن الحظ لا تعاني جمل الاسقاط التي نلجأ اليها (الجمل الفراغية) تحولات كبيرة فهي قليلة الميل على بعضها وذلك بالنظر لضآلة نسبة سرعتنا الطبيعية الى سرعة الضوء * لذا كانت العلوم التي وضعناها لترجمة الظواهر الطبيعية ليست في الواقع سوى مساقط (في الفضاء ذي الابعاد الثلاثة) الظواهر التي تحدث في الحقيقة في المتصل الزماني المكاني ذي الابعاد الاربعة أو « العالم » .

---

* سنبين معنى ذلك بعد قليل .

واذا أردنا تمثيل الاشياء الحقيقية في جملة « المكان ــ الزمان » لما وجب أن نقتصر على تمثيلها في المكان ذي الابعاد الثلاثة فقط بل ينبغي تحديد وضعها في الفضاء ووضعها في الزمن في آن واحد •

وبشكل خاص لا ينبغي لنا في تعريفنا للبعد بين شيئين استعمال كلمة « مسافة » بمعناها المألوف كما لا ينبغي أن نعرف المسافة بين نقطتين قريبتين جدا من بعضهما بالعلاقة :

$$(\text{د ل})^{2} = (\text{د س})^{2} + (\text{د ع})^{2} + (\text{د ص})^{2}$$

وانما يجب استعمال العلاقة :

$$\boxed{(\text{د ل})^{2} = -\text{ث}^{2}(\text{د ز})^{2} + (\text{دس})^{2} + (\text{د ع})^{2} + (\text{دص})^{2}} \quad (1)$$

والعلاقة الجديدة الدالة على المسافة بين نقطتين ونسميها « المجال » (Intervalle) تحوي بالاضافة الى الاحداثيات الفضائية احداثية الزمن وتمثل هذه العلاقة مسافة حقيقية وليس مسقط مسافة ، تمثل « مجالا » حقيقيا وليس مسقط « مجال » •

ولم يضع مينكوسكي العلاقة (١) أعلاه اعتباطا ، وانما استخرجها من تحويلات لورنتز بعمليات جبرية بسيطة •

وبعد ان تم له صياغة معادلة « المجال » قال :

يمكننا اسقاط « المجال » على عدد كبير من الامكنة وعلى عدد كبير من الازمنة تماما كما تسقط المسافات في الهندسة الفراغية ذات الابعاد الثلاثة على عدد كبير من المستويات وعلى عدد كبير من المحاور •

فاذا انتقينا جملة محاور احداثية مطلقة أو فلكية مؤلفة من ثلاثة محاور (م س) ، (م ع) ، (م ص) لتعيين المكان تتجه نحو النجوم الثابتة وأضفنا لها محورا رابعا (م ز) لتقدير الزمن المطلق الفلكي

وحسبنا « المجال » بين نقطتين مردودتين الى هذه الجملة الخاصة لحصلنا عندها على « مجال » تحدده العلاقة (١) أيضا •

و « المجال » المذكور هو مقدار ملموس واقعي ينبغي ان يحافظ على قيمته حتى ولو نظر اليه من جملة مقارنة « رباعية » أخرى تسمح بانتقالها قوانين التحريك الكلاسيكي وتتبدل فقط العناصر اللازمة لقياسه في مختلف هذه الجمل . وهذه العناصر هي كما بينا الاطوال والازمنـــة •

اذا انتخبنا جملة مقارنة « رباعية » مبدؤها ثابت بالنسبة للفضاء المحيط بها (أي سكون نسبي بين مبدأ الجملة والوسط المحيط بها) اعتبرنا عندها الاشياء المجاورة لهذه الجملة الساكنة بدلالتها محــددة باربعة احداثيات (س ، ع ، ص ، ز) • وبالعكس اذا اعتبرنا الاشيــاء المجاورة لهذه الجملة متحركة بالنسبة لمبدئها بسرعة (سر) اضطررنا عندها الى استعمال مجموعة احداثيات جديدة استبدل فيها (س وع وص وز) بالقيم (سَ وعَ وصَ وزَ) وفي هذه الحالة تستبدل العلاقة :

— ث٢ (د ز)٢ + [(د س)٢ + (د ع)٢ ÷ (د ص)٢]   (آ)

بالعلاقة :

— ث٢ (د زَ)٢ + [(د سَ)٢ + (د عَ)٢ + (د صَ)٢]   (ب)

والمقدار (آ) يساوي تعريفا المقدار (ب) وذلك لان المجال (د ل) هو مقدار مستقل عن الجملة الاحداثية المختارة •

ويترجم فيزيائيا الانتقال الجبري من الجملة الاحداثية « المكانية ـ الزمانية » الى جملة احداثية أخرى بحركة انسحاب خاصة لاحــدى الجملتين بدلالة الاخرى ، وينبغي أن تكون الحركة الانسحابية المقترحة حركة انسحابية منتظمة • وقد سبق للميكانيك الكلاسيكي ان ترجم

اختلاف وجهات النظر بين مختلف الجمل بانسحاب منتظم لهذه الجمل حددت تحويلات غاليله الجبرية العلاقة بينها •

ويقترح هنا مينكوسكي استعمال تحويلات لورنتز لترجمة اختلاف وجهات نظر المشاهدين من الجمل المختلفة كي يحصلوا جميعا على « مجال » ثابت لايؤثر في قيمته النهائية اختلاف المقاييس المكانية والزمانية التي يلجأ اليها كل منهم • ولا يسمح لنا اطار هذا الكتاب بأن نسترسل كثيرا في شرح مفاهيم مينكوسكي الرياضية والتي كان لها الفضل الاكبر في تجسيد أفكار اينشتين في اشكال بيانية بسيطة جعلتها أقرب منالا لعقول المفكرين •

واكتفي بشرح بعض الطرق التي لجأ اليها مينكوسكي في التعبير عن أفكاره • من المعلوم انه بالامكان الانتقال من جملة احداثية فراغية الى جملة اخرى بدوران مناسب في الفضاء الاوكليدي • ويعطى البعد بين نقطتين قريبتين فيما لو نظر اليهما من مختلف هذه الجمل بالعلاقة :

$$(\text{د ل})^2 = (\text{د س})^2 + (\text{د ع})^2 + (\text{د ص})^2$$

واذا سمينا المحاور الاحداثية الثلاثة بـ (م س_1 ، م س_2 ، م س_3) أصبحت علاقة المسافة من الشكل :

$$(\text{د ل})^2 = (\text{د س}_1)^2 + (\text{د س}_2)^2 + (\text{د س}_3)^2 \qquad (٢)$$

وبالمثل يمكن ان نعتبر عددا غير محدود من الجمل الاحداثية « الرباعية » في المتصل المكاني ـ الزماني ذي الابعاد الاربعة وتنتقي هذه المحاور بصورة اختيارية بشرط أن يبقى « المجال » بين نقطتين قريبتين ، محققا للعلاقة :

$$(\text{د ل})^2 = -\text{ث}^2 (\text{د ز})^2 + [(\text{د س})^2 + (\text{د ع})^2 + (\text{د ص})^2]$$

واذا رمزنا للاحداثيات بـ $س_١$ ، $س_٢$ ، $س_٣$ ، $س_٤$ وكان $س_١ = س$ ، $س_٢ = ع$ ، $س_٣ = ص$ ، $س_٤ = \sqrt{-١}$ ث ر نتج :

$$(د\,ل)^٢ = (د\,س_١)^٢ + (د\,س_٢)^٢ + (د\,س_٣)^٢ + (د\,س_٤)^٢ \qquad (٣)$$

والعلاقة (٣) تماثل تماما العلاقة الاوكليدية (٢) .

واعتبر مينكوسكي المتصل المكاني ـ الزماني ذا الابعاد الاربعة « متصلا اوكليديا » تحدد خواصه الهندسية المستقيمات والدوائر . ويعرف المستقيم في هذا « العالم » بكونه اقصر خط يصل بين نقطتين . وتعرف الدائرة بكونها المحل الهندسي للنقط المتساوية البعد عن نقطة معينة وتتصف الدائرة بأن نسبة محيطها الى قطرها هي نسبة ثابتة تساوي (π)اما في المتصلات الغير اوكليدية فلا يمكن رسم مستقيمات (سطح الكرة) وتكون اقصر الخطوط الواصلة بين نقطتين من هذه المتصلات خطوط منحنية تسمى بالخطوط الجيوديزية . واذا رسمت دوائر على هذه المتصلات كانت عندها نسبة محيطاتها الى اقطارها لا تساوي العدد (π)وانما قيمة اكبر او اصغر منه .

ومتى مثلت المجال (د ل) بالعلاقة (٣) امكننا عندها تسمية التحويلات التي تجعل مجموع مربعات الاحداثيات ثابتا : دورانا في المتصل المكاني ـ الزماني ذي الابعاد الاربعة الاوكليدي .

واضاف مينكوسكي قائلا : في المتصل الاوكليدي « العالمي » لا ينبغي أن نذكر كلمة نقطة وانما ينبغي أن نقول « نقطة في لحظة معينة » واقترح استعمال كلمة « حادثة » (événement) للدلالة الفيزيائية على النقطة في اللحظة المعينة وتحدد « الحادثة » في « العالم » بأربع احداثيات (س ، ع ، ص ، ز) أو ($س_١$ ، $س_٢$ ، $س_٣$ ، $س_٤$) .

لنفرض ان « الحادثة » المقترح تحديدها هي « أنا » في اللحظة التي

اكتب فيها هذه العبارة • اضع نفسي في مبدأ الجملة الاحداثية • فكيف يمكن ان امثل في المتصل المكاني ـ الزمـاني ذي الابعاد الاربعـة « الحوادث » المحيطة بي ؟ فاذا وجدت نقطة تنطبق على مبدأ الجملة العالمية ؛ على وضعي أنا ؛ رسمت « الحادثة » اعتبارا من هذه اللحظة مسارا ما ومرت في الاوضاع المختلفة : س ، ع ، ص ، ز ••• $س_1$ ، $ع_1$ ، $ص_1$ ، $ز_1$ ••• $س_2$ ، $ع_2$ ، $ص_2$ ، $ز_2$ ••• الخ • فهي سوف ترسم خطا في العالم ذي الابعاد الاربعة ويمر هذا الخط من مبدأ الجملة ويسمى هذا الخط « بخط العالم » (Ligne d'Univers) •

والخطوط العالمية أنواع منها المنحنية ومنها المستقيمة وتمثل هـذه الاخيرة مسارات الاشعة الضوئية في المتصل العالمي الاوكليدي •

ويستحيل علي انشاء هذه الخطوط على الورقة لاني لا أملك هنا سوى بعدين اثنين ؛ بينما يلزمني أربعة أبعاد • واذا ضحيت باحداثيتين (ع و ص) رسمت عندها على الورقة مسقط الحوادث في المستوى (س ، ز) ويعامد هذا المستوى المحورين (ع و ص) •

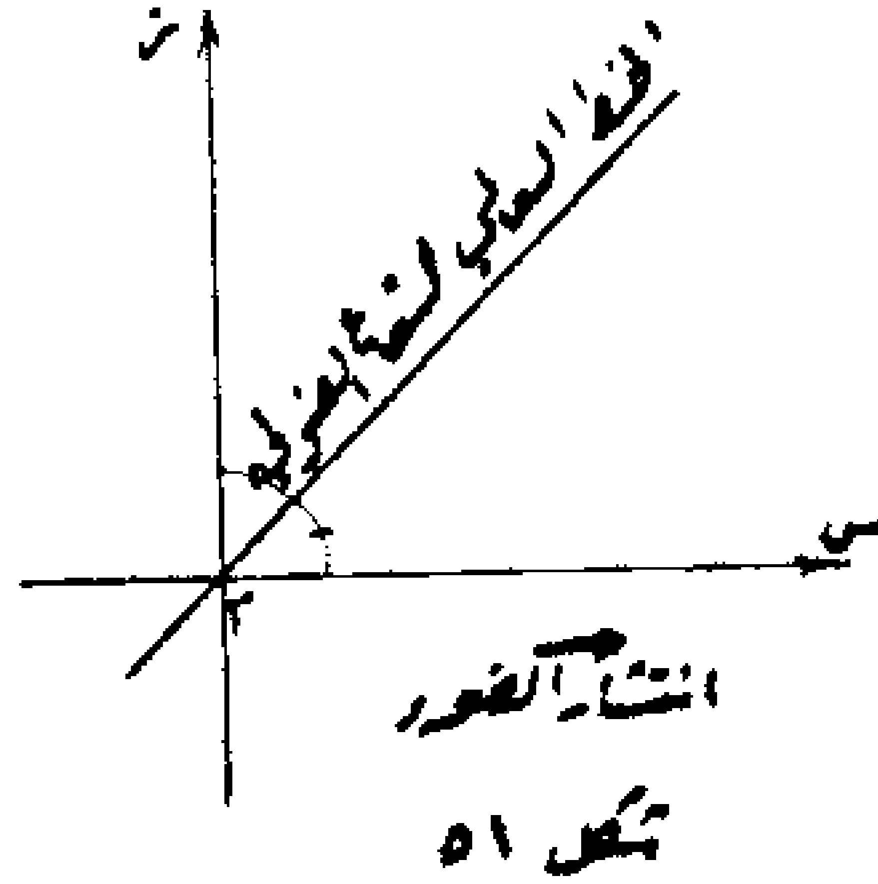
واذا وجهت المحور (م س) من جملتي الاحداثية المقترحة في اتجاه انتشار الشعاع الضوئي ؛ واعتبرت نقط وصول الضوء مع لحظـات وصوله اليها حوادث عالمية كانت احداثيات كل الحادثة هي (س ، • ، • ، ز) وحددت العلاقة س = ث ز معادلة انتشار الشعاع الضوئي • ويكون بالتالي الخط العالمي الممثل للشعاع الضوئي مستقيما يمر من مبدأ الجملـة الاحداثيـة وينصف زاوية المحوريـن (م س ، م ز) (شكل ٥١) •

والمجال (د ل) بين حادثتين قريبتين من هذا الخط يعطى بالعلاقة :

$$(د ل)^2 = - ث^2 (د ز)^2 + (د س)^2$$

غير ان (د س) = ث (د ز) وذلك لان س = ث ز ويكـون بالتالي :

$$(\text{د ل})^{2} = -\text{ث}^{2}(\text{د ز})^{2} + \text{ث}^{2}(\text{د ز})^{2} = \text{صفر}$$



شكل ٥١

وترسم الاشعة الضوئية خطوطا « عالمية » مستقيمة تعرف بالخطوط العديمة الطول وتكون معادلتها في الجملة العالمية من الشكل :

$$-\text{ث}^{2}(\text{دز})^{2} + (\text{د س})^{2} + (\text{د ع})^{2} + (\text{د ص})^{2} = ٠$$

وعرض مينكوسكي طريقة هندسية تخطيطية تمثل القوانين الفيزيائية « العالمية » وتظهر بجلاء صحة أفكار اينشتين في تقلص الاطوال وتمدد الزمن وتركيب السرع الخ .. وساعدت هذه الدراسة التخطيطية في تجسيد علم الحركة النسبي وعلم التحريك النسبي بأشكال هندسية ملموسة وساهمت مساهمة فعالة في اجلاء بعض مفاهيم النظرية النسبية العامـــة .

واضطر مينكوسكي في دراساته التخطيطية الى استعمال بعض المقادير التخيلية (imaginaire) في استبداله مثلا المقدار $-\text{ث}^{2}(\text{د ز})^{2}$ بالمقدار $(\text{د س}_{٤})^{2}$ وبالتالي $\sqrt{-١}\,\text{ث}(\text{د ز})$ بـ $(\text{د س}_{٤})$. والرقـم $\sqrt{-١}$

هو مقدار تخيلي : لذلك لا أرى فائدة من عرض طريقته التخطيطية لانها قد تزيد القارىء غير الضالع بالعلوم الرياضية تعقيدا ، ولا تعطي الفائدة المتوخاة •

وابتكر العالم الارجنتيني انريكه لوديل (Enrique Lodel) عام ١٩٥٥ طريقة تخطيطية جديدة لم ير فيها لزوم لاستعمال المقادير التخيلية ووصل بنتيجتها الى تمثيل واضح لعلمي الحركة والتحريك النسبي وفيما يلي عرض لهذه الطريقة :

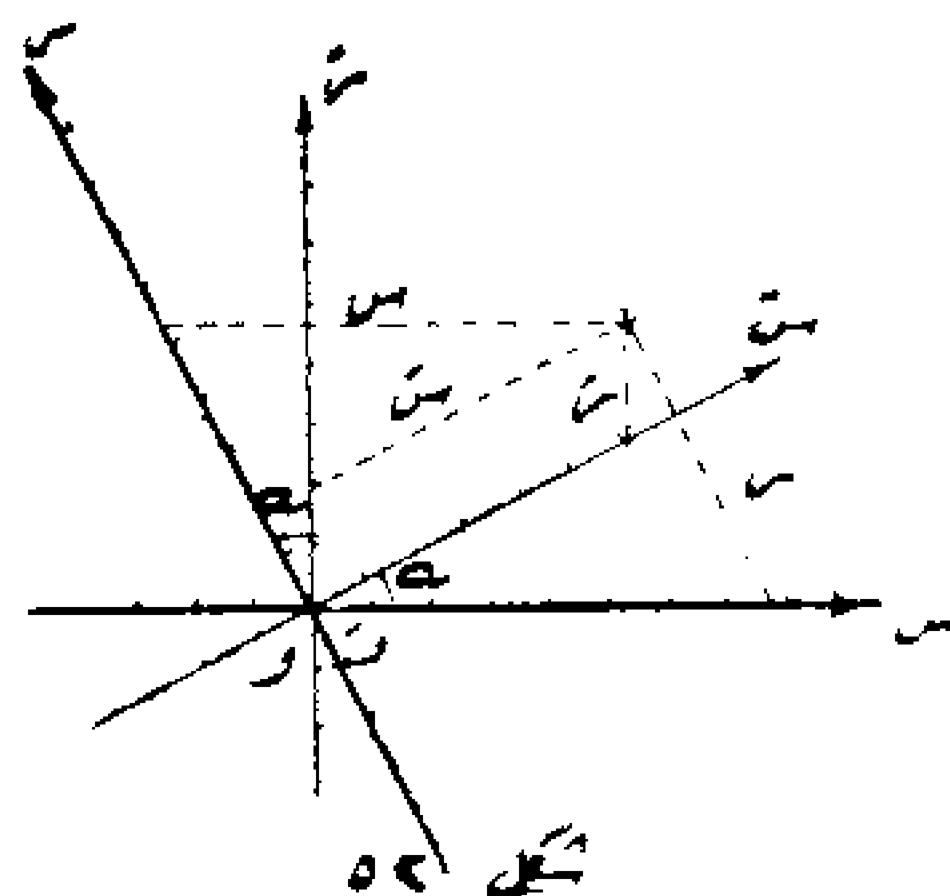
تصور لودل (Lodel) جملة احداثية فراغية عطالية (م) ومساطر وساعات تتحرك على المحور (س) من الجملة (م) بحركة انسحابية منتظمه • تعين المسطرة بطرفيها المتحركين على المحور (س) في المتصل العالمي ذي الابعاد الاربعة بحادثة لها احداثية (س) واحداثية (ز) فقط وذلك لان ع = ص = صفر •

كما يمكننا ايضا رد المساطر والساعات الى جملة مقارنة عطالية أخرى (مَ) توازي محاورها محاور الجملة (م) وينطبق محورها (سَ) على المحور (س) وتنتخب (مَ) بشكل تبقى معه المساطر والساعات المتحركة ساكنة على محورها (سَ) وتمثل عندها في المتصل العالمي ذي الابعاد الاربعة بحوادث لها احداثية (سَ) واحداثية (زَ) فقط وذلك لكون عَ = صَ = صفر ايضا في هذه الجملة •

تتحرك الجملة (مَ) بدلالة الجملة (م) بسرعة (سر) ونفترض المبدأين (ب) و (بَ) منطبقين في اللحظة ز = زَ = صفر •

قال لودل بامكانية تمثيل الظواهر الطبيعية الحقيقية المردودة للجملة « الرباعية » (س ، ع ، ص ، ز) في مستوى احداثي (س ، ز) كما تمثل هذه الظواهر لدى ردها الى الجملة « الرباعية » (سَ ، عَ ،

صَ ، زَ) بمستوى احداثي آخر (سَ ، زَ) وتشترك الجملتان المقترحتان بالمبدأ ويمثل الشكل (٥٢) الجملتين .



يصنع المحور (ز) مع المحور (س) زاوية (ه + $\frac{\pi}{٢}$) .

كما يصنع المحور (سَ) مع المحور (س) زاوية (ه) .

ويصنع المحور (زَ) زاوية ($\frac{\pi}{٢}$) مع المحور (س) .

والزاوية (ه) ليست مجرد زاوية رياضية وانما لها معنى فيزيائي أساسي فهي تحدد سرعة انسحاب الجملة العطالية (مَ) بدلالة الجملة (م) ويكون : جب ه = $\frac{سر}{ن}$ = هـ .

واقترح لودل تقسيم المحاور الاربعة الى أجزاء متساوية يعادل كل جزء منها طولا يساوي ٣٠٠٠٠٠ كم .

ويمثل (و) ، مبدأ الجملة الاحداثية (س ، ز) « حادثة » احداثيتها س = صفر واحداثيتها ز = صفر . فهي تمثل النقطة (ب) مبدأ

الجملة المقارنة (م) كما يمثل (وَ) ، مبدأ الجملة الاحداثية (سَ ، زَ) « حادثة » احداثيتها سَ = صفر واحداثيتها زَ = صفر فهي تمثل النقطة (بَ) مبدأ الجملة المقارنة (مَ) والمبدءان (ب) و (بَ) كما ذكرنا ينطبقان على بعضهما في اللحظة ز = زَ = صفر فهما يشكلان « حادثة » طبيعية واحدة •

وهذا ما دعا الى انطباق المبدأين (و) و (وَ) •

وتمثل كل « حادثة » طبيعية حقيقيــة بنقطة واحدة في مستوى الجملتين (س ، ز) و (سَ ، زَ) ولتكن (حـ) النقطة الممثلة للحادثة ، لدينا في هذه الحالة حـ (س ، ز) و حـ (سَ ، زَ) أيضا •

وينبغي أن تحقق الاحداثيات الاربعة (س ، ز ، سَ ، زَ) علاقتي دوران المحاور الاحداثية بزاوية (ه) •

$$\left.\begin{aligned} \text{س} &= \text{سَ تجب ه} + \text{ز جب ه} \\ \text{ز} &= \text{زَ تجب ه} + \text{س جب ه} \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

وتمكن لودل من استنتاج العلاقتين (١) من تحويلات لورنتز ❊

❊

$$\text{سَ} = \frac{\text{س} - \text{سر ز}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}} \qquad \text{زَ} = \frac{\text{ز} - \text{س}\,\frac{\text{سر}}{\text{ث}^2}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}}$$

$$\text{س} = \frac{\text{سَ} + \text{سر زَ}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}} \qquad \text{ز} = \frac{\text{زَ} + \text{سَ}\,\frac{\text{سر}}{\text{ث}^2}}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}}$$

المطبقة على نقط المحور (س) من الجملة (م) ، المنطبق على المحور (س َ) من الجملة (مَ) المتحركة بدلالة (م) بسرعة (سر) وبرهن بذلك على صحة البناء التخطيطي المقترح •

ويمثل المبدأ (ب) الثابت بدلالة الجملة (م) بالخط العالمي الممثل بالمحور (ز) ومعادلته في الجملة (س ، ز) : س = صفر •

كذلك يمثل المبدأ (بَ) الثابت بدلالة الجملة (مَ) بالخط العالمي الممثل بالمحور (زَ) ومعادلته في الجملة (سَ ، زَ) : سَ = صفر •

ويمثل المبدأ (بَ) المتحرك على المحور (س) من الجملة (م) بسرعة ثابتة (سر) بخط عالمي معادلته : س = سر ز = حب ه ز •

نضع في علاقات لورنتز هـ = حب ه و ث = ١ وفي هذه الحالة تصبح :

$$\text{حب ه} = \frac{\text{سر}}{\text{ث}} = \frac{\text{سر}}{١} = \text{سر} \; ؛ \; \text{و} \; \sqrt{١ - \text{هـ}^{٢}} = \sqrt{١ - \text{حب}^{٢}\,\text{ه}} = \text{تجب ه}$$

وتكتب عندها علاقتا لورنتز على الشكل :

$$(١)\quad \text{سَ} = \frac{\text{س} - \text{حب ه ز}}{\text{تجب ه}} \quad ؛ \quad \text{زَ} = \frac{\text{ز} - \text{س حب ه}}{\text{تجب ه}} \quad (٢)$$

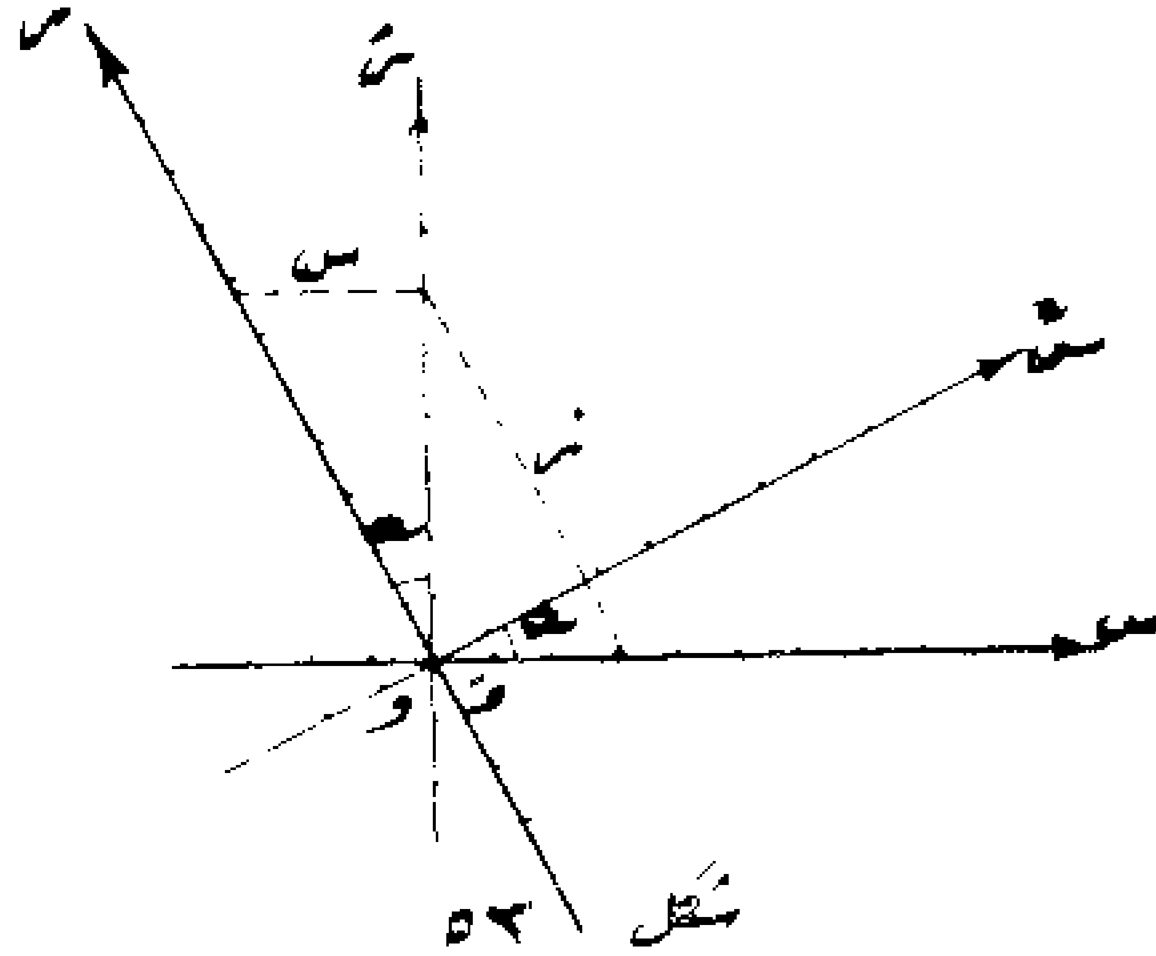
$$(٣)\quad \text{س} = \frac{\text{سَ} + \text{حب ه زَ}}{\text{تجب ه}} \quad ؛ \quad \text{ز} = \frac{\text{زَ} + \text{سَ حب ه}}{\text{تجب ه}} \quad (٤)$$

من (١) ينتج : س = سَ تجب ه + ز حب ه
وهي العلاقة الاولى من العلاقة الهندسية (أ) لدوران المحور
نبدل في (٤) سَ بقيمتها من (١) :

$$\text{ز} = \frac{\text{زَ} + \dfrac{\text{س} - \text{حب ه ز}}{\text{تجب ه}}\,\text{حب ه}}{\text{تجب ه}} = \frac{\text{زَ تجب ه} + \text{س حب ه} - \text{ز حب}^{٢}\,\text{ه}}{\text{تجب}^{٢}\,\text{ه}}$$

وبالاصلاح ينتج : ز = زَ تجب ه + س حب ه
وهي العلاقة الثانية من العلاقة الهندسية (أ) لدوران المحاور .

هذه المعادلة هي في الحقيقة معادلة المستقيم (و زَ) في الجملة (س ، ز) (شكل ٥٣) ويتضح مما تقدم أن مسار « الحادثة » في المتصل العالمي ذي الابعاد الاربعة مسار طبيعي حقيقي لا يتبدل فيما لو نظر اليه من مختلف الجمل العطالية « الرباعية » .



شكل ٥٣

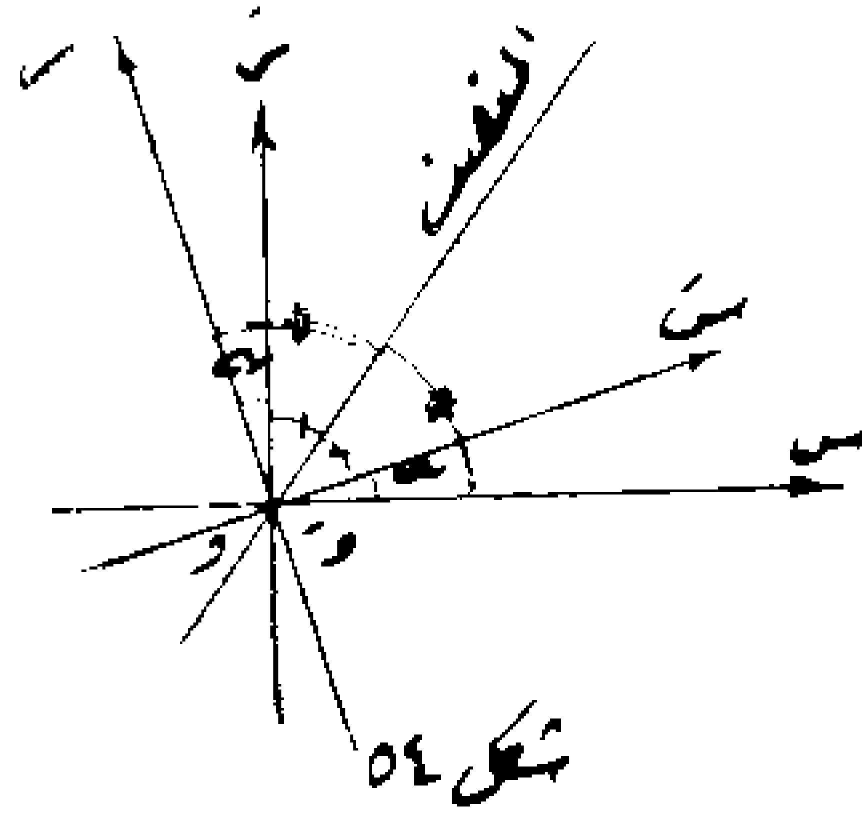
واذا انتشر شعاع ضوئي وفق المحور (س) من الجملة (م) وانبعث من مبدئها (ب) في اللحظة ز = صفر التي كانت فيها النقطة (بَ) مبدأ الجملة (مَ) منطبقة على (ب) ، كانت فواصل النقط التي يصل اليها هذا الشعاع مع أزمنة مروره فيها محددة لحوادث طبيعية تمثل في الجملتين الاحداثيتين (س ، ز) و (سَ ، زَ) بالمعادلتين :

س = ث ز = ز (آ)

سَ = ث زَ = زَ (ب)

والخط العالمي الممثل للعلاقة (آ) هو منصف زاوية المحورين (س ، ز) كما أن الخط العالمي الممثل للعلاقة (ب) هو أيضا منصف زاوية

المحورين (س َ ؛ ز َ) ولا يمكن للشعاع الضوئي أن يمثل الا بخط عالمي واحد اذا وجب التطابق المنصفين ، وهذا هو ما يحدث فعلا وتكفي نظرة واحدة للشكل (٥٤) لكي نتحقق هندسيا من ذلك •



الاثبات التخطيطي لظاهرة تمدد الازمنة :

نفرض الجملة (م) ثابتة وتتحرك الجملة (م َ) بدلالتها بسرعة سر = ١٨٠٠٠٠ كم / ثا • لدينا في هذه الحالة :

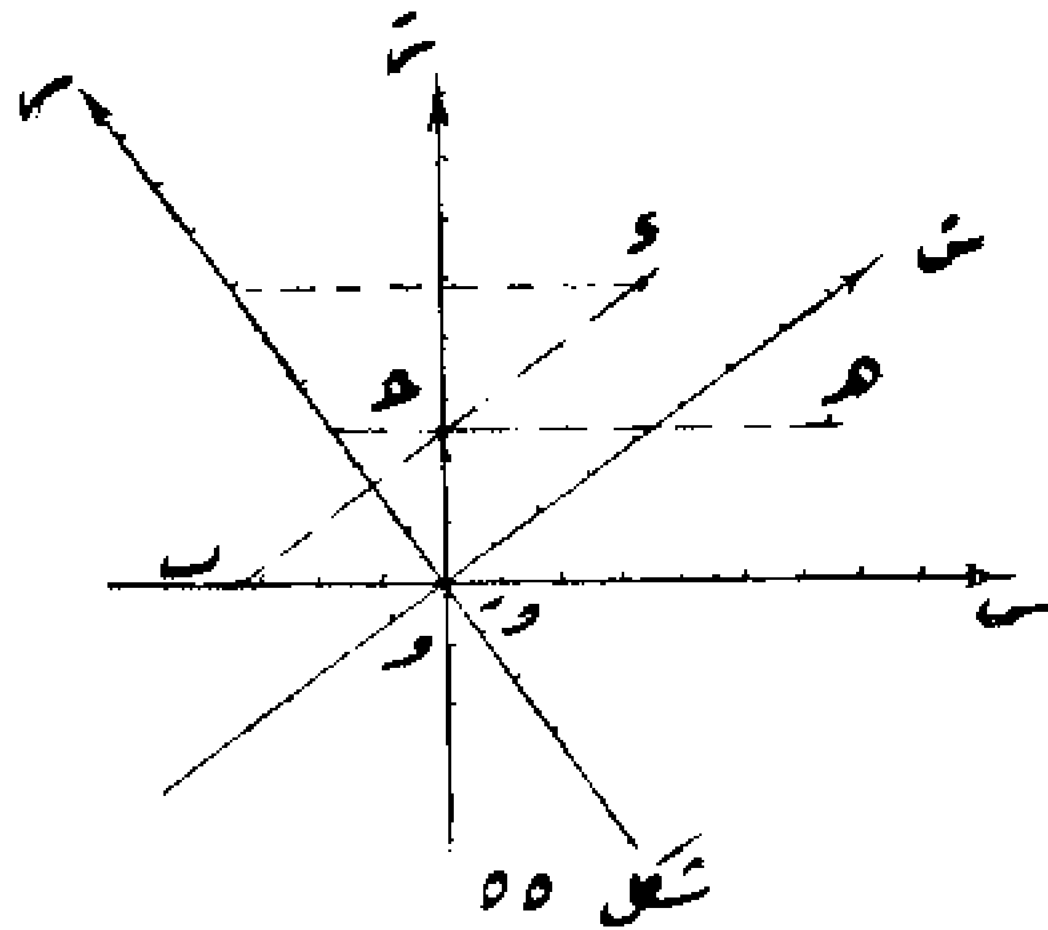
$$\text{حب هـ} = \frac{\text{سر}}{\text{ث}} = \frac{١٨٠٠٠٠}{٣٠٠٠٠٠} = \frac{٣}{٥}$$

ويمثل الشكل (٥٥) الجملتين (س ، ز) و (س َ ، ز َ) ونعتبر الساعات ثابتة في الجملة (م َ) •

تمثل النقط (ب) ؛ (حـ) ؛ (د) ثلاثة حوادث طبيعية حقيقية متوافقة اذا ما نظر اليها من الجملة (م َ) •

فهي تمثل ساعات متوافقة ، ساكنة بدلالة الجملة (م َ) تشير كلها للحظة ز = ٢,٥ ثانية ، موضوعة في مواقع مختلفة من المحور (س َ) • واذا نظرنا الى هذه الساعات من الجملة (م) وجدناها تتحرك بدلالة

هذه الجملة ولا تشير الى لحظة (ز) واحدة بل تشير الاولى الى اللحظة ز = صفر وتشير الثانية الى اللحظة ز = ٣ ثانية وتشير الثالثة الى اللحظة ز = ٦ ثانية •



وتمثل النقطتان (حـ) و (هـ) « حادثتين » متوافقتين فيما لو نظر اليهما من الجملة (م) وتمثل هاتان النقطتان ساعتين ساكنتين بدلالة (م) ، وموضوعتين في موقعين مختلفين من المحور (س) •

أما لو نظر لهاتين الساعتين من الجملة المتحركة (م َ) لوجدنا الساعة الاولى تشير الى زمن يختلف عن الزمن الذي تشير اليه الساعة الثانية •

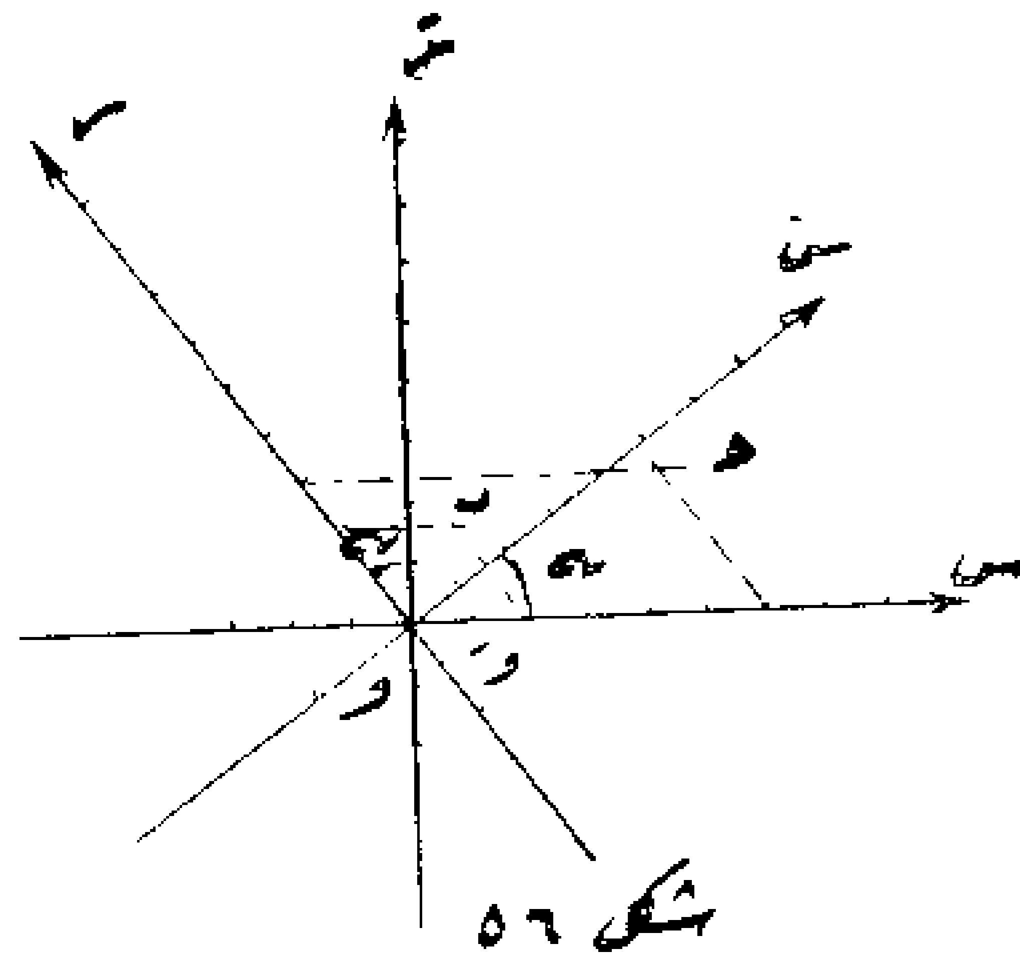
وعندما قال اينشتين بامكانية تبدل الترتيب الزمني لوقوع حادثتين ، ضج العلماء والفلاسفة واقترح بعضهم زجه مع أتباعه في مصح للمجانين ، ظنا منهم أن اينشتين بأفكاره الجريئة الجديدة قد كفر بأول المبادىء الفلسفية ألا وهو مبدأ السببية ، واعتقدوا أنه أقر حدوث الاثر قبل المسبب • ولم تكن الضجة التي أثيرت سوى زوبعة في فنجان وسرعان

ما أحبط اينشتين وأتباعه مساعيهم وأظهروا بجلاء سطحية انتقاداتهم التي بنوها على المفاهيم المدرسية والكلاسيكية معاً .

يقول اينشتين : بامكانية تبدل الترتيب الزمني لوقوع الحادثتين فقط في الحالة التي يكون فيها البعد المكاني للحادثتين أكبر من بعدهما « الزمني » وفي هذه الحالة لا يمكن أن تكون احدى الحادثتين سبباً في وقوع الحادثة الثانية .

فلو تخيلنا وقوع حادثة (ب) في مكان ما ($س_1$) من المحور (س) وفي اللحظة ($ز_1$) مقدرة من الجملة (م) .

وحادثة ثانية (حـ) في مكان ($س_2$) من المحور (س) وفي اللحظة ($ز_2$) مقدرة أيضاً من الجملة (م) . وتقع الحادثة (حـ) بعد الحادثة (ب) ($ز_2 > ز_1$) . البعد « المكاني » للحادثتين هو ($س_2 - س_1$) وبعدهما « الزماني » هو ($ز_2 - ز_1$) (شكل ٥٦) .



شكل ٥٦

فاذا كان البعد المكاني ($س_2 - س_1$) أكبر من البعد الزماني ($ز_2 - ز_1$) أمكن عندها بالنظر الى الحادثتين من جملة مقارنة (مَ)

[تتحرك بدلالة (م) بسرعة (سر)] أحسن اختيارها ، مشاهـدة الحادثة (حـ) تقع قبل الحادثة (ب) (ز′٢ < ز′١) .

فاذا وقعت الحادثة (ب) في نقطة من المحور (س) تبعد عن مبدأ الجملة (م) مسافة (٠٠٠ ٦٠٠ كم) وفي اللحظة ز١ = ٢ ثانية ووقعت الحادثة (حـ) في نقطة من المحور (س) تبعد عن مبدأ الجملة مسافة(٠٠٠ ١٨٠٠ كـم) وفي اللحظـة ز٢ = ٣ ثانية . كان عندها البعد المكاني بـين الحادثتين ٠٠٠ ١٢٠٠ كم أي أربـع واحدات والبعد الزماني بـين الحادثتين ثانية واحدة . والبعد المكاني كما نرى أكبر من البعـد الزماني .

ولا يمكن للحادثة (ب) أن تكون سببا في وقوع الحادثة (حـ) لانه لو حدث ذلك لوجب أن ينتقـل تأثير (ب) في الفضاء مسافة ٠٠٠ ١٢٠٠ كم في ثانية واحدة وسرعة الانتقال هذه تفوق سرعة الضوء فهي اذا سرعة يستحيل وجودها .

فاذا نظر للحادثتين أعلاه من جملة متحركة (م′) ووجد أن الحادثة (حـ) تقع قبل الحادثة (ب) بدلالة هذه الجملة كان هذا أمرا ممكنا ولا يخالف مبدأ السببية . وحتى تكون احدى الحادثتين سببا في وقوع الحادثة الثانية ينبغي إذن أن يكون البعد المكاني للحادثتين مساويا على الاكثر بعدهما الزماني .

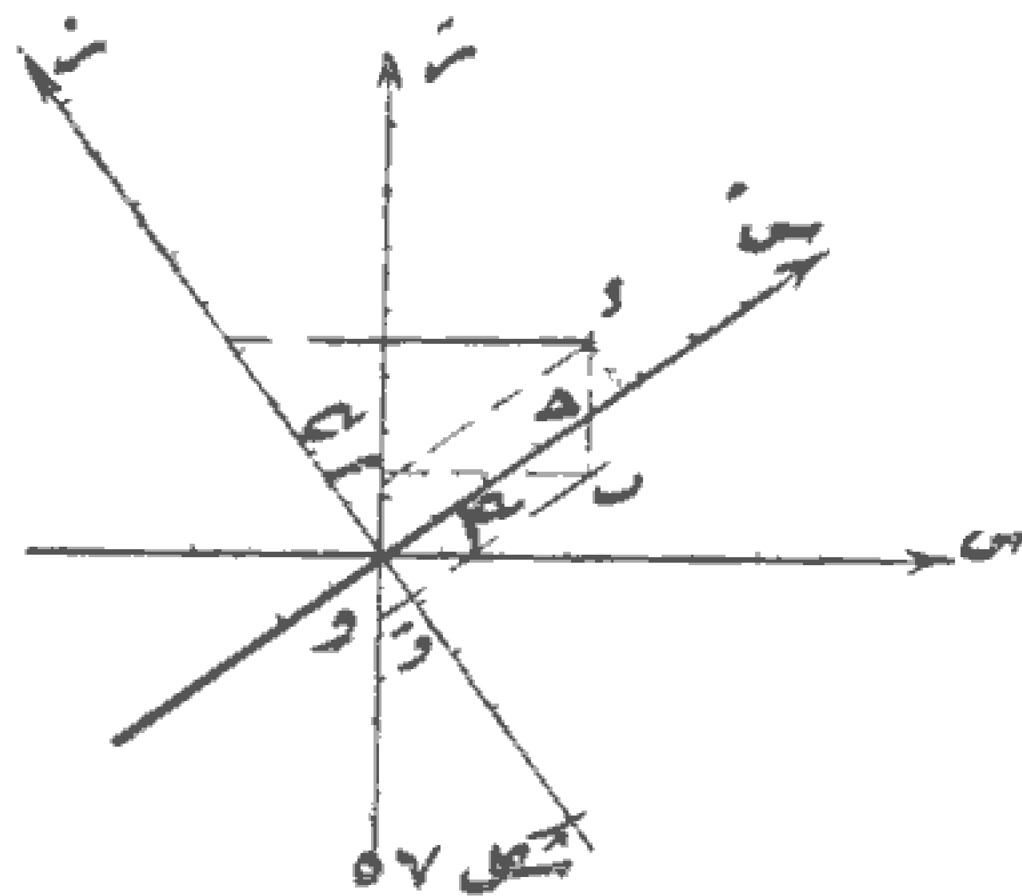
ومن بين الاعتراضات التي وجهت الى اينشتين قول أحدهم :

لقد تمت خطوبتي اليوم واتفقت مع خطيبتي على الزواج بعد عام فهل بامكان اينشتين أن يدلنا على الجملة المتحركة بدلالة الارض التي يمكن لقاطنيها أن يلاحظوا منها تبدل ترتيب الحادثتين : حادثة الخطوبة وحادثة الزواج . واذا تم له ذلك فهل بامكان هؤلاء أن يخبروني عن عدد أولادي وماذا يحدث لو أني غيرت رأيي في غضون هذا العام وفكت خطوبتي ؟

ويجيبه اينشتين « كلا » يستحيل وجود الجملة المتحركة التي يمكن أن يتبدل فيها ترتيب هاتين الحادثتين ، فان رغبتك في الزواج مهما كانت جامحة لا تمكنك من أن تعدو بسرعة أكبر من سرعة الضوء من مكان خطوبتك الى مكان زواجك •

فالبعد المكاني بين حادثتي الخطوبة والزواج لا يمكن أن يزيد على بضع آلاف الكيلومترات بينما البعد الزماني بين الحادثتين كما سبق وقلت هو عام كامل وهذه مسافة زمنية أكبر بملايين المرات عن المسافة المكانية ، وفي هذه الحالة يستحيل تبديل ترتيب وقوع الحادثتين •

وبعد هذه المعترضة نعود مجددا الى تمثيل سير الساعات • يمثل المستقيم (ب حـ ء) من الشكل (٥٧) الخط العالمي لساعة ، ساكنة بدلالة الجملة (مَ) ، موضوعة على المحور (سَ) في نقطة تبعد عن المبدأ (بَ) بمقدار (٤ × ٣٠٠٠٠٠ = ١٢٠٠٠٠٠ كم) تشير الساعة في الحادثة (ب) الى اللحظة ز = ـ ١ ثانية من ثواني الجملة (مَ) وفي الحادثة (حـ) تشير الى اللحظة زَ = صفر وفي الحادثة (ء) تشير الى اللحظة زَ = ١ ثانية •



وتقاس الفترة الزمنية الفاصلة بين الحادثتين (ب) و (ء) في الجملة (مَ) بثانيتين من ثواني هذه الجملة .

وتتحرك الجملة (مَ) بدلالة الجملة (م) بسرعة سر = ١٨٠٠٠٠ كم/ثا ويدلنا الشكل (٥٧) على وقوع الحادثة (ب) عندما تشير الساعة المتحركة بدلالة الجملة (م) الى اللحظة ز = ١,٧٥ ثانية مقدرة بثواني هذه الجملة . وتقع الحادثة (ء) عندما تشير الساعة ذاتها الى اللحظة ز = ٤,٢٥ ثانية مقدرة أيضا بثواني هذه الجملة وتقاس الفترة الزمنية الفاصلة بين الحادثتين (ب) و (ء) في الجملة (م) بـ : ٤,٢٥ ـــ ١,٧٥ = ٢,٥ ثانية من ثواني هذه الجملة .

فاذا مثلت الحادثة (ب) ضربة من ضربات الساعة ومثلت الحادثة (ء) الضربة التالية ، قدر الشخص الساكن بدلالة هذه الساعة الفترة الزمنية الفاصلة بين الضربتين بثانيتين بينما يقدر الشخص المتحرك بدلالة هذه الساعة الفترة الزمنية الفاصلة بين الضربتين بثانيتين ونصف من ثواني ساعة مماثلة لها يضعها في جيبه ، ويحق له عندها أن يستنتج تباطؤ ضربات الساعة المتحركة .

واذا رمزنا بـ (ز.) للفواصل الزمنية في الساعة الساكنة وبـ (ز) لفواصلها عندما تكون متحركة نجد :

$$\frac{ز}{ز.} = \frac{٢,٥}{٢} = \frac{٥}{٤}$$

ومن جهة ثانية لدينا سر = ١٨٠٠٠٠ كم/ثا و ث = ٣٠٠ ٠٠٠ كم/ثا

$$\frac{سر}{ث} = \frac{١٨٠٠٠٠}{٣٠٠٠٠٠} = \frac{٣}{٥} = هـ$$

$$\sqrt{1 - \text{هـ}^2} = \sqrt{1 - \frac{9}{25}} = \frac{4}{5}$$

ومنه
$$\frac{\text{ز}}{\text{ز}_\cdot} = \frac{5}{4} = \frac{1}{\frac{4}{5}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}}$$

وبالتالي :
$$\text{ز} = \frac{\text{ز}_\cdot}{\sqrt{1 - \text{هـ}^2}}$$

وهي علاقة تمدد الازمنة التي وجدها اينشتين بالاعتماد على فرضيته .

تقلص الاطوال :

تتخيل مسطرة (هـَ دَ) ساكنة بدلالة الجملة (مَ) ومنطبقة على المحور (سَ) بدايتها في (هـَ) ونهايتها في (دَ) . في اللحظة زَ = صفر مقدرة من الجملة (مَ) تحتل نقط المسطرة أمكنتها المقررة من « العالم » وتشكل حوادث متواقتة في الجملة (مَ) وتمثل في المستوى الاحداثي (سَ ، زَ) (شكل ٥٨) بالقطعة المستقيمة (بَ. حـَ.) من المحور (سَ) وفي اللحظة زَ = ١ ثانية مقدرة أيضا من الجملة (مَ) تمثل الحوادث المتواقتة في هذه الجملة والموافقة لاوضاع نقط المسطرة بالقطعة المستقيمة (بَ١ حـَ١) الموازية للمحور (سَ) والقاطعة للمحور (زَ) في النقطة (زَ = ١) . وهكذا ... يبدو مما تقدم امكانية تمثيل المسطرة الساكنة بدلالة (مَ) « بشريحة عالمية » توازي المحور (زَ) ويكون طول المسطرة كما يقاس من الجملة (مَ) الساكنة بدلالتها ممثلا بالقطعة :

بَ حـَ = بَ١ حـَ١ = بَ٢ حـَ٢ = ... = لَ

شكل ٥٨

أما لو نظرنا للمسطرة المتحركة من الجملة (م) . والممثلة بالشريحة العالمية الموازية للمحور (زَ) وأردنا قيـــاس طولها من هذه الجملة ، لوجب أن ننظر الى طرفي هذه المسطرة في لحظة واحدة مقدرة من هذه الجملة . والحوادث المتوافقة في الجملة (م) هي فقط تلك الحوادث التي تقع على المستقيمات العالمية الموازية للمحور (س) فالحوادث المتوافقة في اللحظة ز = صفر تقع على المحور (س) ذاته .

واذا نظرنا الى المسطرة المتحركة في اللحظة ز = صفر حصلنا عندها على الحادثتين المتوافقتين الممثلتين لطرفيها بتقاطع المحور (س) مع الشريحة العالمية الممثلة لهذه المسطرة وهما (بـ) و (حـ) .

وبطريقة مماثلة نحصل عـــلى الحادثتين الممثلتين لطرفي المسطرة المتحركة في اللحظة ز = ١ ثانية مقدرة في (م) من تقاطع الشريحة مع المستقيم الموازي للمحور (س) والقاطع للمحور (ز) في النقطة ز = ١ وهكذا .

وطول المسطرة مقاسا من الجملة (م) يساوي اذن طول القطعة ب. حـ. أو ب١ حـ١ أو ب٢ حـ٢ .... ونرمز له بـ ل .

وتحسب ل بدلالة ل. من الشكل (٥٨) :

$$\text{ل} = \text{ل}_{.}\ \text{تجب هـ}$$

غير ان تجب هـ = $\sqrt{\text{١} - \text{جب}^{2}\,\text{هـ}} = \sqrt{\text{١} - \text{هـ}^{2}}$

فيكون $\text{ل} = \text{ل}_{.}\sqrt{\text{١} - \text{هـ}^{2}}$

وهذه هي معادلة تقلص الاطوال التي حصلنا عليهـا بالاعتماد على فرضيتي اينشتين .

* * *

القسم الثاني

النظرية النسبية العامة

الفصل الأول

ضرورة تعميم النظرية النسبية الخاصة

في أثناء عرض المبادىء الاساسية في الميكانيك الكلاسيكي بينا الاسباب والشواهد التي دفعت بالعالم نيوتن الى الاخذ بفرضيتي المكان المطلق والزمان المطلق .

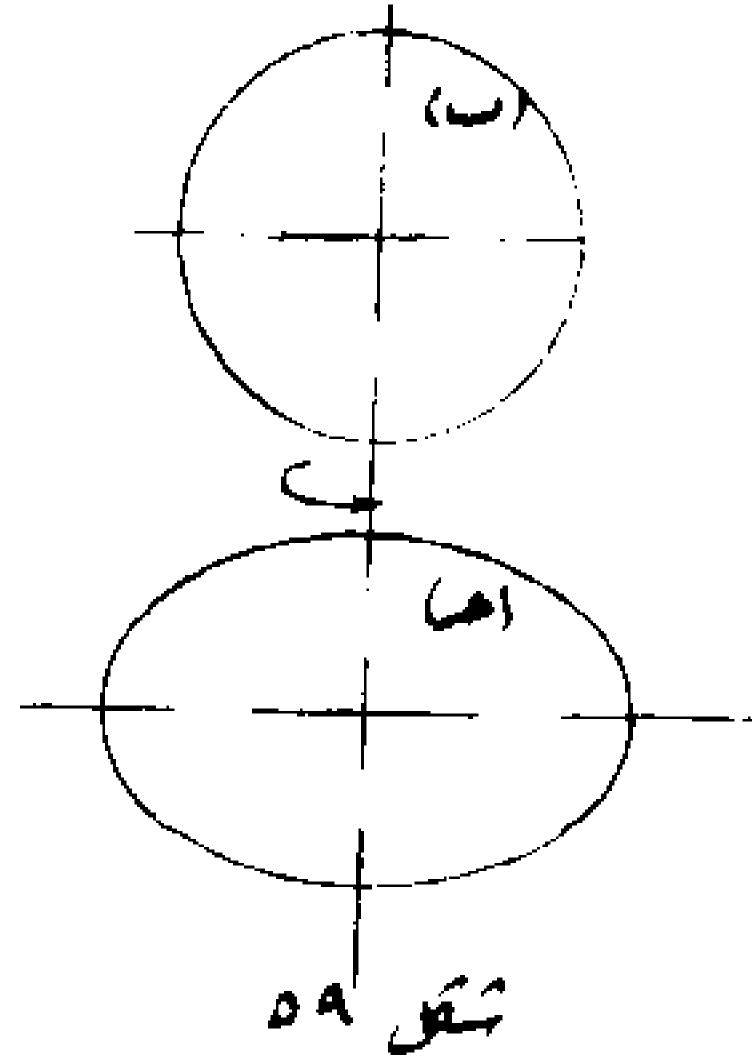
قام نيوتن بتجربة « دلو الماء » واستنتج منها أن نشوء القوى المحورية أو القوى النابذة يعود الى تأثير المكان المطلق على الاجسام المتحركة بحركة متغيرة .

وعارض نفر من العلماء والفلاسفة فكرة المكان المطلق ووصفوها بالسطحية واستهجنوا صدور مثل هذه الافكار عن عالم اتسمت أبحاثه وآراؤه بالعمق والمنطق السليم .

والمثال التالي يوضح لنا سطحية فرضية المكان المطلق . لنتخيل في الفضاء العالمي جسمين (ب) و (حـ) متماثلين شكلا ونوعا يبعدان عن بعضهما بعدا كبيرا بشكل يمكن معه اهمال التأثير الجاذب لاحدهما في الآخر .

ولنفرض وجود حركة دورانية منتظمة نسبية بين الجسمين حول محور يصل مركزيهما ؛ يعني ذلك ان الناظر الساكن بدلالة أحد

الجسمين يرى الجسم الآخر يدور حول المحور بحركة دائرية منتظمة • (شكل ٥٩) •



شكل ٥٩

تجري قياسات هندسية على كل من (ب) و (حـ) من قبل ناظر ساكن بدلالة كل منهما •

والمفروض أن الناظر الساكن ، بدلالة (ب) وجده كرويا ، وأن الناظر الساكن بدلالة (حـ) وجده مفلطحا (مجسم قطع ناقص دوراني) •

يعلل الميكانيك الكلاسيكي الظاهرة أعلاه على النحو التالي :

يحتفظ الجسم (ب) بشكله الكروي لانه ساكن بدلالة المكان المطلق بينما يصبح الجسم (حـ) الكروي بالاصل مفلطحا لكونه يدور بدلالة المكان المطلق • فالدوران يخلق قوى نابذة تؤثر في ذرات الجسم الكروي وتدفع بها بعيدا عن محور الدوران ويؤدي ذلك الى تحول الشكل الكروي الى شكل مفلطح •

فالمكان المطلق بنظر الكلاسيكيين هو المسؤول المباشر عن حدوث

ظاهرة التفلطح فهو بنظر علماء الفلسفة العامـل المتسبب في حدوث الظاهرة لذا كان فرض وجود المكان المطلق ضرورة فلسفية يحتمها مبدأ السببيـة •

ولا يمكن للجسم (ب) أن يـكون العامل المتسبب في حدوث التفلطح في الكرة (حـ) لانه لو تم ذلك لما تأخر الجسم (حـ) بدوره عن احداث تفلطح مماثل في الكرة (ب) . لكون الشروط الطبيعيـة في الجسمين متماثلة •

فلا بد اذن من ايجاد السبب المباشر في حدوث الظاهرة فاضطر نيوتن الى ارجاع هذه الظاهرة الى عامل خارجي . وفرض وجود المكان المطلق وجعله المسؤول الوحيد عن خلق القوى المحورية التي تؤثر في ذرات الكرة الدائرة (حـ) وتدفع بها بعيدا عن محور الدوران وتتسبب في تفلطحها •

والسؤال الآن هـل تفي فرضية المكان المطلق بـكافة متطلبات مبدأ السببية ؟ وهل أمكن لهذا المكان المفروض اثبات حقيقته في مجالات تجريبية أخرى غير التي ذكرناها (نشوء القوى المحورية) ؟ •

من المعروف حتى الآن أن فرضية وجود المكان المطلق لم تؤيد الا في تلك الظواهر التي لمجرد تعليلها وضعت هذه الفرضية •

والمعرفة السليمة الموضوعية تستهجن هذا النوع من الفرضيات وترى فيها عامل هدم للحواجز التي يرفعها عادة البحاثون التجريبيون لكبح جماح رغبتهم الملحة في الحصول على النتائج التجريبية المحققة للواقع النظري •

ويطلق على العلوم التي تبنى على هذا النوع من الفرضيات اسـم العلوم الروحانية وهي فرع من العلوم الميتافيزيكية •

فاذا طارت من أمامي الورقة التي أكتب عليها ، كنت حرا في أن أعتقد أن روح نيوتن هي التي انتزعتها من أمامي ، وان كنت عاقـلا وموضوعيا أعدت هذه الظاهرة الى تأثير تيار الهواء الذي حصل نتيجة فتح نافذة غرفتي من قبل ولدي . وحتى لو أني لم أشعر بلفحة تيـار الهواء هذا تكون فرضيتي الثانية أقرب للواقع من فرضيتي الاولى لكونها تربط بين الظاهرة المطلوب تعليلها (انتزاع الورقة) وظواهر أخرى مماثلة يمكن مراقبتها تجريبيا .

وتمتاز العلوم الطبيعية عن العلوم الروحانية بكونها تتردد في انتقاء فرضياتها لتبتعد في اختيارها عن كل مؤثر عاطفي أو تخيلي أو روحاني .

وفرضية المكان المطلق يصح أن تعتبر في الحقيقة فرضية روحانية أكثر منها فرضية طبيعية ، فلو سأل أحدنا عن سبب نشـوء القوى المحورية أجبناه على الفور : السبب هـو المكان المطلق . ولكن اذا ما سألنا عن طبيعة وماهية المكان المطلق ترددنا في الاجابة ولم يكن باستطاعتنا أن نقول سوى أن المكان المطلق هو المسؤول عن نشـوء القوى المحورية ولا يتصف بعدها بغير هذه الصفة .

فنحن ندور اذن في دائرة مفرغة ويدعونا هذا التناقض الظاهر الى ضرورة استبدال فرضية المكان المطلق بفرضية أخرى أقرب منها للواقع التجريبي لتعبر بشكل أعمق عن الاسباب الداعية لنشوء القوى المحورية وحتى تفي تماما بالشروط السليمة لمبدأ السببية .

ولنعد الآن الى مناقشة مثال الجسمين (ب) و (حـ) . اذا فرض الجسمان في معزل عن كل تأثير خارجي ، واختلف رغم ذلك شكل (ب) عن شكل (حـ) بسبب الحركة الدورانية النسبية وقفنا عندها مكتوفي الايدي أمام هذه الظاهرة العجيبة التي لا يمكن تعليلها بأية فرضية صالحة .

والسكوت في مثل هذه الظروف أجدى من الكلام الذي لا بد وأن يكون سطحيا خاطئا .

ولكن هل من الممكن عمليا عزل الجسمين (ب) و (حـ) عزلا كاملا في الكون ؟ الجواب على ذلك هو « كلا » اذ لم يسبق لأي كان أن تمكن من اجراء تجارب على جسمين عزلا كاملا عن كافة المؤثرات الخارجية في هذا الكون .

وعليه لا يصح القول بأن الجسمين (ب) و (حـ) يخضعان أثناء حركتهما النسبية الى شروط طبيعية متماثلة ، لاننا لا يمكن ان نعلم كيف يتأثر كل من الجسمين بالاجسام المادية المجاورة والبعيدة والموزعة في كافة بقع الكون . فاذا لاحظنا اختلافا بين شكلي الجسمين (ب) و (حـ) ناتجا عن الحركة الدورانية النسبية ، (وهذه ظاهرة فلكية يومية فهنالك أجرام سماوية أكثر تفلطحا من غيرها) . وجب عندها تعليله بفرضية سليمة لا تبتعد عن فكرة تأثير الكتل المادية المجاورة والبعيدة على الجسمين (ب) و (حـ) .

فكل جسم من هذا الكون يكون في الواقع محاطا بعدد غير محدود من الاجسام الاخرى بعضها قريبا منه والبعض الآخر بعيـد عنه . وتتحرك مجموعة الاجسام بحركة نسبية مضطربة وبطيئة بشكل يمكن معه اعتبار هذه المجموعة بمثابة كتلة صلبة مجوفة تحوي داخلها الجسم المذكور .

وحتى يحدث تفلطح الشكل لا بد من وجود قوى محورية تؤثر في الجسم واذا رغبنا في تعيين سبب نشوء هذه القوى المحورية ما علينا الا أن نعيـده الى الاجسام المجاورة والبعيدة ، المحيطة بالجسم المـدروس .

وفي هذه الحالة فقط يكون فرضنا منطقيا واقعيا مبنيا على ركائز

متينة أقرتها التجارب وما زالت مستعدة لاقرارها في كل زمان ومكان •

ويعتمد علماء الفلك في تحرياتهم علـى جملة مقارنة يعتبرونهـا « ثابتة » يطلقون عليها اسم الجملة الفلكية (جملة مطلقة) يردون اليها الحركات الظاهرية لمجموعة النجوم البعيدة وتبدو هذه الحركات في هذه الجملة فوضوية لا يسودها اتجاه مفضل • ودلت الدراسة الرياضية أن تفلطح الكوكب السيار يكون كبيرا بقدر ما تكون سرعة دورانه بدلالة النجوم الثابتة والبعيدة كبيرة • فالحركة التي تسبب في تفلطح الكوكب السيار ليست اذن حركة هذا الكوكب بدلالة المكان المطلق وانما هي في الواقع حركته النسبية بـدلالة مجموعة النجوم البعيدة والثابتة ولا يمكننا ادراك هذه الحركة الا بمقارنة وضع الجسم بوضع جسم آخر ، فلو ثبت الكوكب السيار ودارت في المقابل مجموعة النجوم الثابتة حوله لتفلطح أيضا شكله تماما كما كان ليحدث في الحالة التي يدور هو فيها وتبقى النجوم ثابتة •

ولا يؤثر انتقاء الجملة المقارنة على الحركة النسبية بين جسمين كما لا يؤثر أيضا في وضعهما النسـبي • وحتى تكون القوانين الفيزيائية متماثلة في مختلف الجمل المقارنة ينبغي أن يقتصر مضمون هذه القوانين على الحركات النسبية والاوضاع النسبية فقط •

وقد غفل الميكانيك الكلاسيكي ومن بعده النظرية النسـبية الخاصة عن هذه الحقيقة ، فقد اعتبرا أن الطبيعة مجزأة الى نوعين ، نوع يصلح فقط في الجمل المقارنة العطالية أي الجمل المتحركة بحركات مستقيمة منتظمة ، ونوع آخر يصلح في الجمل المتسارعة وهي الجمل التي تتحرك بحركة دائرية أو متغيرة • ووصل الميكانيك الكلاسيكي في نهاية المطاف الى القول باستحالة تحديد الحركة المستقيمة المنتظمة للجملة بتجارب ميكانيكية تجرى فيها •

وعندما أتى اينشتين بنظريته النسبية الخاصة قرر عندها استحالة تحديد الحركة المستقيمة المنتظمة للجملة بتجارب ميكانيكية أو ضوئية أو كهربائية تجرى فيها •

واينشتين نفسه الذي يرى أن الفضاء وهو لا شيء وأن الحركة نسبية قد أزعجته الخاصة المنفردة للحركة المتسارعة ؛ ولما كان يعتقد اعتقادا جازما بتوافق طبيعة الكون رفض الاعتقاد بأن أي جسم يتحرك حركة غير مستقيمة منتظمة ؛ يجب أن يكون جسما شاذا منفردا تختلف فيه قوانين الطبيعة من ميكانيكية وفيزيائية •

وتطور الظاهرة الطبيعية هو تطور واحد قائم بحد ذاته لا ينبغي له أن يتأثر بحركة الجملة المقارنة التي ترد اليها هذه الظاهرة • وتساءل اينشتين قائلا : « لماذا لا يكون كافة المشاهدين سواسية في مواجهة العلم ؟ » وراودته عندها فكرة ملحة بضرورة تعميم النظرية النسبية حتى تشمل كافة الجمل المقارنة من عطالية ومتسارعة ؛ وليبرهن بواسطتها أن العلوم الطبيعية هي علوم لا متغيرة ؛ عالمية ؛ سرمدية لا ينالها تبديل أو تحريف مهما اختلف المكان والزمان •

وعاد اينشتين الى دراساته السابقة وناقشها نقاشا موضوعيا ؛ فتعاد لمثال القطار المتحرك على الشريط :

آ ــ القطار يتحرك بدلالة المحطة •

ب ــ المحطة تتحرك بدلالة القطار •

في (آ) تحدد الحركة بدلالة جملة مقارنة مقيدة بالمحطة •

وفي (ب) تحدد الحركة بدلالة جملة مقارنة مقيدة بالقطار •

والحركة النسبية حقيقة واقعية لا ينبغي أن يؤثر اختيار الجملة على طبيعتها ؛ هذا هو أول المبادىء الطبيعية ولا يختلف فيها اثنان •

واستطاع اينشتين في نظريته النسبية الخاصة تحقيق ذلك ، وتوصل بفرضياته ، الجريئة الى برهان التعادل التام بين جملة القطار وجملة المحطة . فكانت القوانين الفيزيائية المترجمة لظواهر طبيعية تجري في الجملتين متماثلة تماما في هاتين الجملتين . واشترطت النظرية النسبية الخاصة أن تكون الجمل المقارنة المتعادلة في حركة نسبية مستقيمة منتظمة فالشخص الجالس في القطار المتحرك بدلالة المحطة حركة مستقيمة منتظمة يعتبر نفسه ساكنا ، والمتحرك هي المحطة ، كذلك يعتبر الشخص الجالس في المحطة نفسه ساكنا والمتحرك هو القطـار ، وكلاهما على حق فيما يدعيه لان القوانين الطبيعية تأخذ شكلا متماثلا في الجملتـين « العطاليتين » المعتبرتين : القطار والمحطة .

ولكن ماذا يحدث لو ضغطت لجامات القطار المتحرك فجأة ؟ قد يتعرض الشخص الجالس في القطار الى صدمة قوية تدفعه الى الامام . وفي مثل هذا الظرف هل يظل الشخص في حيرة من أمره ؟ وهل يمكننا مهما أوتينا من قوة الحجة وبلاغة المنطق أن تقنعه بأن قطاره كان ساكنا ولم يطرأ على حالته الحركية أي تبديل ؟ سيهزأ منا لا محالة حتى ولو استحلفناه بالعلم والآلهة . سيجيبنا بأن القوانين الفيزيائية في جملته في حالتها الحركية الجديدة لم تعد مماثلة للقوانين الفيزيائية المصاغة في جملته في حالتها الحركية السابقة . فقانون العطالة مثلا الذي كان محققا في جملته السابقة أصبح غير محقق في الجملة الجديدة التي يقول بأنها اكتسبت حركة متسارعة (أو متباطئة) ويسألنا بهزء وبساطة أن نشرح له ان استطعنا السبب الذي دفعه من كرسيه الى الارض وهشم وجهه . هل نقول له ان روح نيوتن أو روح اينشتين هي التي حملته من فوق مقعده ودفعت به الى الارض ؟ أم نقول له وهو عين المنطق أن القـوى المحورية الناتجة عن الحركة المتغيرة هي التي قامت بهذا العمل ؟

وبالرغم من كل ذلك أصر اينشتين على رأيه وقال :

« تكون الجمل المقارنة ، بغض النظر عن حالتها الحركية ، متكافئة ؛ وتصاغ القوانين الفيزيائية فيها بشكل متماثل » .

ونشر عام ١٩١٦ النظرية النسبية العامة التي برهنت صحة ادعائه وأحدثت في الاوساط العلمية ثورة متأججة ما زال أوارها يدفع موكب العلم بقفزات هائلة الى الامام حتى ساعتنا هذه .

* * *

الفصل الثاني

مبدأ التعادل بين العطالة والجاذبية

وضع نيوتن قانون العطالة وابتكر المكان المطلق وقيده بالحركة المطلقة .

وكانت عطالة الجسم أو قصوره هي الصفة التي يكسبه اياها المكان المطلق ، ولولا وجود المكان المطلق لكانت قوة صغيرة كافية لاعطاء الجسم سرعة غير محدودة .

والجسم الذي يتبع قانون العطالة ينبغي أن يكون بعيدا عن كل تأثير خارجي أي معزولا عن كل مادة .

وبينا في الفصل السابق أن فرض « المكان المطلق » كان فرضا سطحيا لايمكن التحقق منه تجريبيا ، واقترحنا ضرورة استبداله بفرضية أخرى يقرها الواقع التجريبي ، وقلنا باعتبار عطالة الجسم ناتجة عن تأثير الاجسام ، القريبة والبعيدة ، في هذا الجسم .

وتكون مقاومة الجسم لتغير حركته أو وضعه ناتجة عن التأثيرات الخارجية الآتية من الاجسام الاخرى المحيطة بهذا الجسم . وهنالك أفعال متبادلة بين كافة الاجسام أطلقنا عليها اسم فعل الجاذبية ، وذكرنا في حينه كيف أن التجارب الدقيقة قد أثبتت التساوي المطلق بين « الكتلة العاطلة » و « الكتلة الثقيلة » وفرق العالم نيوتن بين حادثتي العطالة والجاذبية ، وبين بأن عامل العطالة لا يتجلى الا في حالة الحركة على المستوى الافقي فقط ، ووضع للجاذبية قانونا خاصا نص على أن القوة « العجيبة » التي يجذب بها جسم مادي جسما ماديا آخر تزداد بازدياد

جداء كتلتي الجسمين المتجاذبين وتتناقص بازدياد مربع البعد بينهما •

واذا اعتبرنا جسمين من نوع واحد وشكل واحد أحدهما صغير والثاني كبير كانت عطالة الصغير صغيرة والجاذبية المؤثرة عليه صغيرة أيضا ، وعطالة الجسم الكبير كبيرة والجاذبية المؤثرة عليه كبيرة أيضا •

وتنظم الجاذبية المؤثرة على الجسم بحيث يمكنها فقط التغلب على عطالته وهذا ما يعلل توافق سقوط الاجسام في الخلاء بغض النظر عن أنواعها وأشكالها •

وقبل العلماء بالتوافق بين الجاذبية والعطالة قبولهم للايمان والعقيدة ، ودام عدم فهمهم سبب هذا التوافق لفترة قرنين ونيف بعد نيوتن •

وشك اينشتين في أن التعادل بين الجاذبية والعطالة كان مجرد صدفة من مصادفات الطبيعة . ورفض الاخذ بالرأي السائد والقائل بأن الجاذبية تؤثر لحظيا عن بعد ، ورأى أنه من غير المحتمل أن تصل قوة جاذبية الارض للاجسام الى أبعد الآفاق في الفضاء لحظيا ، وأنها تجذب كل جسم بقوة تساوي المقاومة الناتجة عن عطالة هذا الجسم ، بل أعتقد أن ظاهرتي العطالة والجاذبية رغم اختلافهما في قوانين نيوتن لا بد وأن تكون لهما جذور واحدة •

ونادى عندها اينشتين بمبدأ التعادل بين العطالة والجاذبية ، وحقق بواسطته ما كان يصبو اليه العلماء في تعـادل كافة الجمل المتحركة بالنسبة للظواهر الطبيعية ، وانتقل بالنظرية النسبية العامة من كونها موضوعة فلسفية روحانية الى نظرية علمية واضحة نعتبرها اليوم من أسلم نظريات العلوم المجردة •

وبحث اينشتين في كتابه « النسبية » (Relativity) في الجاذبيـة العالمية وقال : اذا تركنا حجرا وشـأنه نراه يسقط الى الارض واذا

سألنا عن سبب سقوطه ؟ كان الجواب : يسقط الحجر الى الارض لان هذه الاخيرة تجذبه اليها .

هذا هو على الاقل جواب نيوتن ومدرسته ، وتجيبنا الفيزياء الحديثة (أواخر القرن التاسع عشر) على سؤالنا كما يلي :

برهنت دراسة الظواهر الكهرطيسية أن فكرة التأثير اللحظي عن بعد فكرة خاطئة ، ولا يمكن للتأثير أن يصل لاماكن بعيدة الا بوجود وسط مادي ينقله من قريب الى أقرب .

فاذا قربنا مغناطيسا من قطعة حديدية انجذبت القطعة نحو المغناطيس، ولا نقول عندها بأن المغناطيس أثر بصورة مباشرة على القطعة عبر الفضاء الخالي بل نعلل ما سبق بقولنا بأن المغناطيس يولد في الفضاء المحيط به مجالا مغناطيسيا يؤثر بدوره على القطعة الحديدية ويجعلها تتحرك مندفعة نحو المغناطيس .

وساهمت فرضية المجال المغناطيسي في تعليل الظواهر الكهرطيسية بشكل يرتضيه المنطق السليم وتحققه المشاهدات التجريبية ، ويمكننا أن ننظر لحادثة الجاذبية الارضية من زاوية مماثلة : تولد الارض في الفضاء المحيط بها مجالا جاذبا يؤثر في الحجر ويجعله يندفع نحوها .

وتدلنا التجارب على أن تأثير الجاذبية الارضية على جسم معين يتضاءل وفق قانون محدد ، وذلك عندما يزداد بعد الجسم عن الارض ، وعلينا بالتالي أن نأخذ هذه الظاهرة بعين الاعتبار اذا رغبنا في صياغة قانون الجاذبية .

ويمتاز « مجال الجاذبية الارضية » عن المجال المغناطيسي بكونه يكسب الاجسام المتأثرة به تسارعات لا تعتمد على نوعها أو شكلها أو حالتها الفيزيائية . فقطعة الرصاص وريشة الطائر وورقة الشجر تتحرك

في مجال الجاذبية الارضية متوافقة (في الخلاء) وذلك اذا بدأت حركتها من السكون وبدون سرعة ابتدائية .

وتوصلنا هذه الصفة المميزة لمجال الجاذبية الارضية الى النتيجة الهامة التالية :

ينص القانون الاساسي في التحريك الكلاسيكي على :

القوة المحركة = الكتلة العاطلة × تسارع الحركة

والكتلة العاطلة ليست في نظر نيوتن سوى عامل ثابت يختص بالجسم المتحرك ويدل على مدى مقاومته للتسارع .

والمجال الجاذب هو العامل الفعال في تحريك الجسم لذا أمكن وضع القانون التالي :

القوة المحركة (الجاذبة) = الكتلة الثقيلة × شدة مجال الجاذبية

والكتلة الثقيلة خاصة مميزة من خواص الجسم المتأثر بمجال الجاذبية ، وبدمج القانونين أعلاه بعد المساواة بين القوتين المتحركتين ينتج :

$$\text{التسارع} = \frac{\text{الكتلة الثقيلة}}{\text{الكتلة العاطلة}} \times \text{شدة مجال الجاذبية}$$

ويمتاز مجال الجاذبية كما ذكرنا باعطائه الاجسام المتأثرة به على اختلاف أنواعها وأشكالها ، تسارعات متماثلة تتناسب مع شدة هذا المجال في الموضع الذي تسقط فيه هذه الاجسام .

وعليه ينبغي أن تكون النسبة $\frac{\text{الكتلة الثقيلة}}{\text{الكتلة العاطلة}}$ ثابتة تأخذ قيماً متماثلة في كافة الاجسام .

وبانتقاء مناسب للوحدات القياسية يمكن أن تأخذ النسبة أعلاه القيمة « واحد » وفي هذه الحالة نقول :

« تساوي كتلة الجسم العاطلة كتلته الثقيلة »

وسلم نيوتن بهذا التساوي ، غير أنه لم يتمكن من تعليله . واعتبر الكتلتين العاطلة والثقيلة مقدارين فيزيائيين يحددان حركة الجسم ولكل منهما وظيفة خاصة .

غير أن التعليل الصحيح للقانون أعلاه يكون باعتبار الكتلة العاطلة والكتلة الثقيلة اسمين لمسمى واحد ترمزان لخاصة فيزيائية واحدة من خواص الجسم ، وتتجلى هذه الخاصة وبحسب الظروف اما على شكل عطالة أو على شكل جاذبية (أو ثقل) .

أما نحن فلا يمكننا التمييز بين ما هو كتلة عاطلة وما هو كتلة ثقيلة ، اذ يمكن أن نسميها كتلة عاطلة حين تكون هي بالفعل كتلة ثقيلة والعكس بالعكس . ولما كان ثقل الجسم هو نتيجة مباشرة لتأثير الاجسام المجاورة عليه وجب عندها بالضرورة أن تكون عطالة الجسم هي أيضا نتيجة مباشرة لتأثير الاجسام المجاورة على هذا الجسم .

وفي نهاية هذه المناقشة وضع اينشتين نظرية جديدة في الجاذبية أيدتها المشاهدات التجريبية ، وأعطتنا هذه النظرية فكرة أدق وأوضح للكون ونجحت في تعليل ظواهر فلكية ، فشلت في تعليلها نظرية نيوتن في الجاذبية العالمية .

ولم يكتف اينشتين في تعليل التعـادل المطلق بين الكتلة العاطلة والكتلة الثقيلة من الناحية الرياضية ، بل نجح أيضا في اعطاء التعليل الفيزيائي لها ، ولجأ في سبيل ذلك الى عدد من الامثلة كانت غاية في البساطة والوضوح .

تخيل اينشتـين نفرا من العلماء في غرفة مصعد مغلقة الجوانب لا يمكنهم مشاهدة ما يجري خارج نطاق غرفة مصعدهم ، ولنفرض أن

المصعد الذي هو أحد مصاعد ناطحات السحاب المتعددة الطوابق ، قد انفلت من حباله وتحرك دون أي قيد .

بالنسبة للاشخاص الموجودين خارجه يسقط المصعد سقوطا حرا بحركة متسارعة بانتظام تسارعها يساوي شدة الثقالة الارضية في مكان التجريب ، بينما لايشعر الاشخاص داخل المصعد بما يحدث لمصعدهم. واذا أخذ أحدهم قطعة نقود من جيبه وتركها وشأنهـا عجب لحالها ، فهي لا تسقط الى الارض كعهده بها ، بـل تبقى معلقة في الفضاء ويمكنه أن يستردها في كل لحظة ، وتنتابه الدهشة لما حصل ويحتدم الجدل التالي بين العلماء :

يقول العالم الذي ترك قطعة النقود لزملائه : « ألا علمتم يارفاق بما حصل ؟ لقد انفلت المصعد من حباله ونحن نسقط الآن في الفضاء سقوطا حرا ، وسنواجه كارثة لا يحمد عقباها ، فالمصعد وقطعة النقود وأنا وأنتم نسقط جميعا بسرعة واحدة ، ويساوي تسارع حركتنا تسارع الثقالة الارضية » .

ويجيبه أحد زملائه : « لا تجزع أيها الزميل لقد غدر بنا رفاقنا ووضعونا في صاروخ فضائي وأطلقوا الصاروخ في اتجاه القمر ونمر الآن في مرحلة انعدام الجاذبية ، وما تلاحظه من بقاء قطعة النقود ساكنة بدلالة المصعد لا يعدو كونه ناتجا عن انعدام الجاذبية في هذا المكان ، ونحن الآن معلقون في الفضاء بعيدا عن تأثير الاجسام الخارجية في بقعة يسميها الكلاسيكيون بقعة عطالية أو مطلقة ، واذا قذفت قطعة النقود في اتجاه معين فانك سوف تراها ترسم مسارا مستقيما بحركة منتظمة ، واقفز ان أردت على أرض المصعد فسوف ترى نفسك تطفو بكل يسر نحو السقف بسرعة تتناسب مع الجهد المبذول » .

ولا يمكن للعلماء المجتمعين الاعتراض على أحد الرأيين فكلاهما على حق فيما يدعيه .

وهنا يغير اينشتين المنظر المعروض :

يتصور العلماء كأنهم ما زالوا في مصعدهم ذاك ، انما نقـل هذا المصعد فعلا هذه المرة الى رقعة من الكون معزولة عزلا تاما عن المؤثرات المادية الخارجية ، وربطت الحبال بسقف المصعد وشد هذا الاخير بقوة ثابتة الى الاعلى ينشأ عنها تسارع ثابت ، وفرض هنا أيضا أن العلماء داخل المصعد لا يعلمون حقيقة وضعهم وهم يقومون باجراء التجارب الفيزيائية .

يلاحظون أولا أن أقدامهم تضغط بثبات على أرض المصعد ، ويأخذ أحدهم من جيبه قطعة نقود ويتركها وشأنها فيراها تسقط نحو أرض المصعد بحركة « شاقولية » متسارعة بانتظام ، ويأخذ بعدها قلما وورقة ويتركهما وشأنهمـا فيجدهما يسقطان أيضا نحو أرض المصعد بحركة متوافقة ثم يرمي قطعة النقود في اتجاه أفقي مواز لارض المصعد فيجدها ترسم قطعا مكافئا ، ويقوم ببعض التجارب الدقيقة فيجد نوعا من التجاذب المتبادل بين الاجسام المادية ، ويضع قانونا خاصا يحدد جاذبيتها فيجد التأثير الجاذب يتضاءل بازدياد مربع المسافة بين الجسمين المتجاذبين . ويضع أخيرا أجساما على منضدة أفقية ، ويؤثر عليها بصدمات معينة فيجد مقاومة من قبل هذه الاجسام للصدمة ، وتختلف درجة المقاومة من جسم لآخر ويعرف عندها « الكتلة العاطلة » لهذه الاجسام ، ويترك هـذه الاجسام حرة وشأنها فيجدها تسقط متوافقة نحو أرض المصعد ويعرف بذلك « الكتلة الثقيلة » ويستنتج التساوي بين الكتلتين .

وتدله تجاربه المتعددة هذه على حقيقة أساسية وهي أن غرفة المصعد التي هو فيها ، هي في ظروف عادية تماما فهي ساكنة وتؤثر عليها الارض بجاذبيتها .

ويتصدى له أحد زملائه قائلا: «كلا أيها الزميل لسنا كما تزعم في غرفة ساكنة على سطح الارض ، بل نحن في مصعد بعيد عن كل تأثير جاذب وتؤثر على مصعدنا قوة خارقة انتزعته من الجاذبية الارضية فوضعته في بقعة من الكون خالية من المادة ، وتابعت هذه القوة فعلها محركة اياه بحركة مستقيمة متسارعة بانتظـام تسارعها يساوي شدة الثقالة على أرضنا ، ويمكنني بسهولة أن أعلل لك الظواهر الطبيعية التي أجريتها :

أنت وأنا والمصعد ومن فيه نشترك جميعا بهذه الحركة ، وتشترك بها أيضا قطعة النقود التي بيدك ، وبمجرد أن تتركها يدك تزول عنهـا القوى المسرعة لعدم بقاء الاتصال بينها وبين الجسم (المصعد) الذي تؤثر فيه القوة ، وهي بالاستناد الى قانون العطالة تقوم بحركة مستقيمة منتظمة سرعتها تساوي سرعة المجموعة (المصعد ومن فيه) في اللحظة التي تركت فيها يدك القطعة ، هذا من جهة ومن جهة ثانية ، تتـابع أرض المصعد حركتها المتسارعة ، فهي تقترب تدريجيا من قطعة النقود لتلحق بها بعد فترة من الزمن ، فهنالك اذن حركة نسبية بين قطعة النقود وبين أرض المصعد . فأنت تنظر الى هذه الحركة النسبية معتقدا أن قطعة النقود هي المتحركة وأرض المصعد ساكنة ، بينما أنظر اليها أنا معتقدا أن قطعة النقود تتحرك نحو الاعلى بحركة مستقيمة منتظمة ، وتتحرك أرض المصعد نحو الاعلى أيضا بحركة متسارعة بانتظام سرعتها الابتدائيةتساوي سرعة قطعة النقود .

فالحركة النسبية واحدة بالنسبة لكلينا تعللها أنت بقوى جاذبية الارض أي بالكتلة الثقيلة لقطعة النقود ، وأعللها أنا بالحركة المتسارعة أي بالكتلة العاطلة لهذه القطعة » .

ولا يمكن للعلماء المجتمعين الاعتراض على أحد الرأيين ، فكلا منهما على حق فيما يدعيه .

فهنالك اذن تعادل تام بين الكتلة العاطلة والكتلة الثقيلة حتى من الوجهة الفيزيائية .

وينقلنا أخيرا اينشتين الى غرفة المصعد وقد ربطت بحبال في أرجوحة تدور بانتظام حول محور من الفضاء الكوني ، وقد فرض بأن الغرفة خالية من كل زينة وشكلها مكعب بحيث لا يمكن للعلماء الجالسين فيها تمييز جدار من جدرانها عن الآخر . ولا أرض الغرفة عن سقفها ؛ الا عن طريق القوة التي تجذبهم نحو أحد السطوح الداخلية .

الموجودون خارج الغرفة يرون دورانها حول المحور ويتنبؤون بوجود القوى النابذة التي تدفع بالعلماء والاشياء الحرة في هذه الغرفة نحو أحد أطرافها الجانبية .

اما العلماء داخل الغرفة فلا يعرفون شيئا عن وضعهم الشاذ هذا ، فهم يشعرون بضغط أجسامهم عـلى أحد الجوانب ويسمونه « أرض » الغرفة . واذا ترك أحدهم قطعة نقود وشأنها وجدها تندفع بحركة متسارعة بانتظام نحو أرض الغرفة ؛ واذا قفز من مكانه لا يعلو نحو السقف بل يعود ليسقط من حيث قفز ، واذا رمى قطعة النقود بشكل يوازي أرض الغرفة وجدها ترسم قطعا مكافئا .

ويعتقد العالم وهو على هذا الحال أنه في ظروف عادية وأن غرفته ساكنة يؤثر فيها مجال جاذب .

واذا ثبت العالم حبلا في « سقف » غرفته وعلق بطرفه الحر جسما ماديا بـدا له الحبل مشدودا الى « الاسفـل » و « شاقوليا » واذا سألناه تعليل هذه الظاهرة أجاب : يؤثر الجسم المعلـق بالحبل بقوة شاقولية ناتجة عن تأثير المجال الجاذب في هذا الجسم . ويبذل الحبل قوة معاكسة نسميها «شد الحبل» توازن الجسم . وشد حبل التعليق يتناسب

مع الكتلة الثقيلة للجسم •

ويجيبه أحد رفاقه بما يلي :

«كلا ايها الرفيق لسنا في غرفة ساكنة واقعة في مجال جاذب بل نحن في منطقة من الفضاء معزولة عن تأثير كافة المجالات الجاذبة ، وغرفتنا هذه تدور حول محور كوني بحركة منتظمة وتخلق هذه الحركة في كل جسم حر في غرفتنا الدائرة قوة نابذة تتناسب مع « الكتلة العاطلة » لهـذا الجسم وتدفعه بعيدا عن محور الدوران •

وما تقوله أنت عن « تحت أو فوق » من غرفتنا ليس في الحقيقة سوى مجرد اعتبار ، وما نسميه نحن عندما نكون على الارض « تحت » انما هو اتجاه الجاذبية ، وما أسميه أنا الآن « تحت » هو اتجاه القوة النابذة •

ويمكن بالتالي تعليل التجارب التي أجريتها منذ لحظات في غرفتنا الدائرة بتأثير القوة النابذة التي كما ذكرت تتناسب مع « الكتلة العاطلة » للاجسام المجرب عليها » •

ولا يمكن للعلماء المجتمين الاعتراض على أحد الرأيين فكلاهما على حق فيما يدعيه •

ويوضح لنا مثال المصعد التعادل التام بين المجال الجاذب والحركة المتسارعة (الحركة المتغيرة) وبالتالي بين الكتلة الثقيلة والكتلة العاطلة وتأخذ القوانين الطبيعية شكلا متماثلا في الجملة العطالية الواقعة تحت تأثير مجال جاذب وفي الجملة المتحركة بحركة متغيرة •

ويسمح لنا ما تقدم باعتبار الجملة المقارنة المقيدة بالكرة الارضية التي تدور حول محورها وتنتقل في الفضاء على مدار حول الشمس ، « جملة عطالية » يؤثر على الكتل الموجودة فيها مجال جاذب •

كما يمكن اعتبـار الجملة المقارنة المقيدة بالكرة الارضية معادلة لجملة تتحرك بحركة متغيرة بدلالة جملة عطالية مفروضة ولا يؤثر على هذه الجملة الجديدة أي مجال جاذب .

وتوصلنا هذه النتيجة الى المفهوم العام للنسبية « القوانين الطبيعية تصاغ بشكل واحـد في مختلف الجمل المقارنة مهما كانت حالتهـا الحركية » .

والجسم المعزول عن كل تأثير خارجي يرسم في الجملة العطالية مسارا مستقيما يقطعه بحركة مستقيمة منتظمة . واذا أعدنا حركة هذا الجسم الى جملة مقارنة تتحرك بحركة متغيرة كان مسار الجسم المعزول بدلالتهاخطا منحنيا ، ولكن اذا سلطنا على الجسم المعزول والمردودللجملة المتغيرة مجالا جاذبا معينا أمكن عندها تحويل المسار المنحني الى مسار مستقيم يرسمه الجسم بحركة منتظمة .

والعملية العكسية ممكنة أيضا ويمكننا تحويـل الحركة المنحنية المتغيرة التي يرسمها جسم ، أثر عليه مجال جاذب وردت حركته الى جملة عطالية ، الى حركة مستقيمة منتظمة ، في جملة تتحرك بحركة متغيرة .

وأطلق اينشتين اسم « الحركة العطانية » على حركة الجسم الذي يكون معزولا عن تأثير كافة أنواع القوى . ما عدا تلك التي تنشأ عن المجالات الجاذبة . واذا حدث وانعدمت القـوى الجاذبة المؤثرة في الجسم ، نحصل عنـدها على الحركة العطالية كما يعتبرها الميكانيك الكلاسيكي والنظرية النسبية الخاصة .

ويقول اينشتين : تتماثل القوانين الفيزيائية في كافة الجمل المتحركة مهما كان نوع حركتها بشرط أن تتضمن هذه القوانين امثالات خاصة تدعى بأمثالات الجاذبية ، وتختلف هذه الامثالات من جملة الى أخرى

وتعتمد على الحالة الحركية للجملة المقارنة المعتبرة ٠

وبعد هذه المناقشة الموضوعية عاد اينشتين مجددا الى مثال القطار والمحطة ٠

قال : اذا تحرك القطار على شريطه بحركة مستقيمة منتظمة وأغلقت جوانب العربة الجالس فيها الشخص ، ظن عندها أنه ساكن وكان محقا في ادعائه ، لان القوانين الفيزيائية المعبرة عن التجارب التي يجريها تأخذ شكلا مماثلا للقوانين التي كان يحصل عليها في مخبره الساكن على سطح الارض ٠

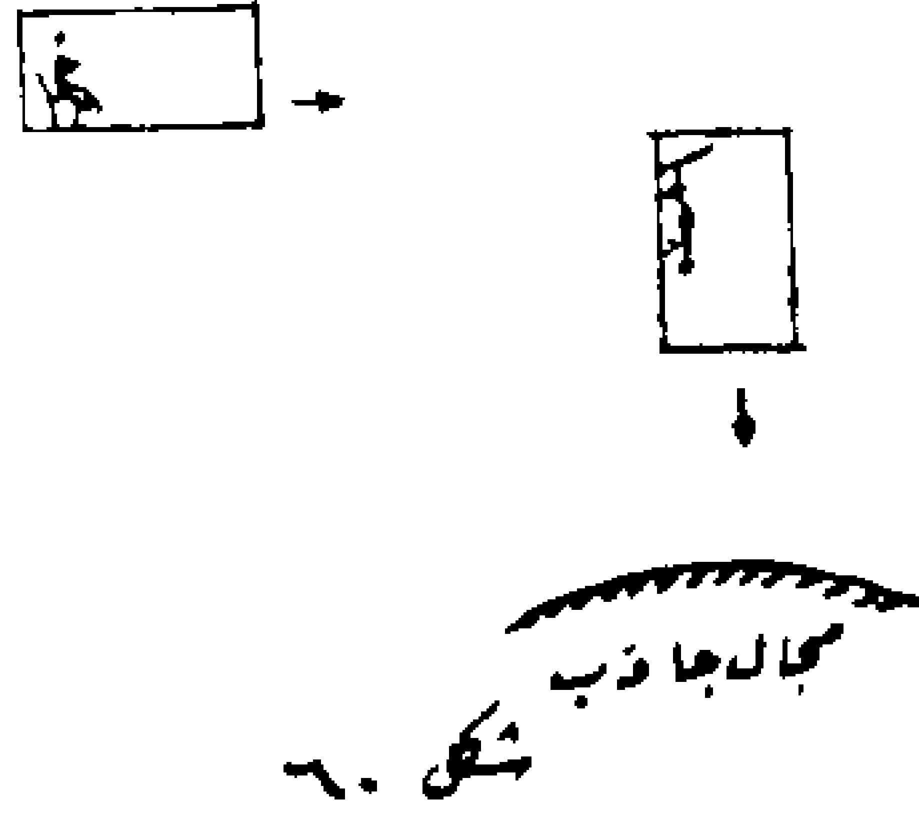
وهذا الشخص عالم بحالته يعرف أنه داخل احدى عربات قطار ، فاذا انتزع من مقعده وطرح على الارض علل هذه الظاهرة بما يلي : كان القطار يسير بانتظام على شريط مستقيم وضغطت لجاماته فأدى ذلك الى تباطؤ الحركة واندفعت الى الامام بسبب عطالتي لان العطالة تأبى تغير الحركة ٠

ويقترح اينشتين تعليل الظاهرة بشكل آخر يقول :

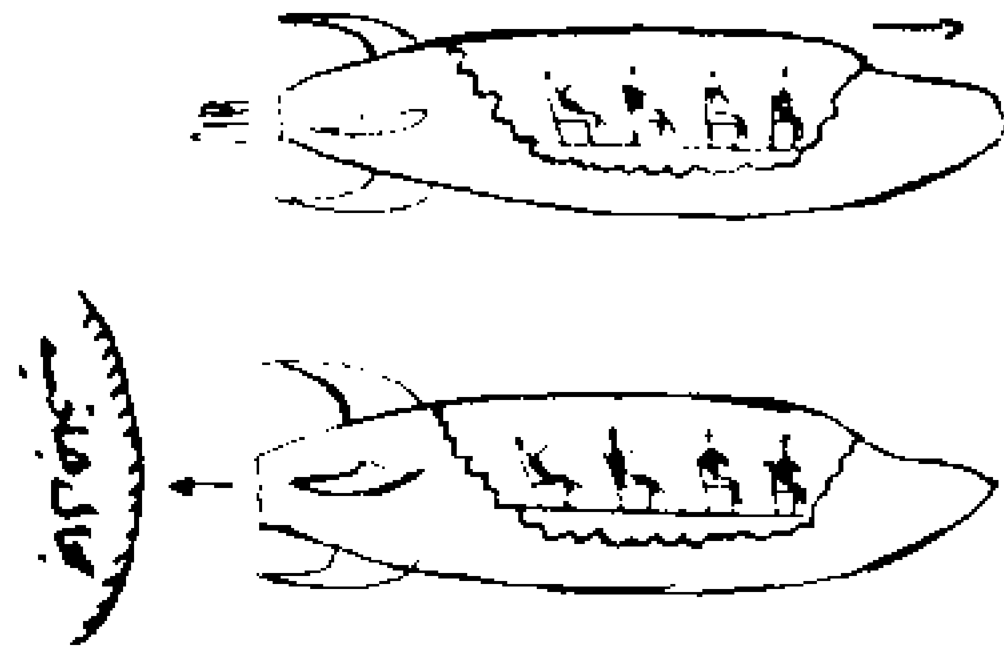
كان القطار ساكنا على شريطه واندفع الشخص الى الامام بسبب نشوء مجال جاذب متغير داخل العربة التي يجلس فيها يمكن أن يتولد نتيجة مرور كتلة جاذبة هائلة من أمام العربة ، وفي هذه الحالة يصبح الجدار الامامي للعربة « أرض » الغرفة المتأثرة بالمجال الجاذب كما يصبح الجدار الذي يستند اليه مقعد الشخص « سقفا » للغرفة ، والشخص الجالس في مقعد يستند الى سقف الغرفة لا بد وأن يقع في اتجاه أرضها ٠

والحركة المتغيرة تكافيء تماما مجالا جاذبا معينا (شكل ٦٠) ٠

ويوضح المثال التالي الظاهرة السابقة : تتخيل صاروخا يسير في الفضاء الكوني بحركة مستقيمة منتظمة (شكل ٦١) ٠ لا يشعر ركاب



شكل ٦٠



شكل ٦١

الصاروخ بهذه الحركة ويظنون أنفسهم ساكنين معلقين في الفضاء وفجأة يشعر الركاب بقوة تدفعهم من الامام الى الوراء ضاغطة أجسامهم على مقاعدهم .

يعلل بعض الركاب هذه الظاهرة كما يلي : كان الصاروخ يسير بحركة مستقيمة منتظمة وفجأة أصبحت حركته متسارعة ، وتأبى عطالة أجسامهم تغيير حركتهم ، لذلك تنضغط أجسامهم على ظهر المقعد .

ويعلل البعض الآخر الظاهرة على النحو التالي : الصاروخ مازال

على حركته وقد مر وراءه جرم سماوي هائل جعل بمجاله الجاذب مؤخرة الصاروخ « أرضا » له ومقدمته « سقفا » والاجسام الحرة داخل الصاروخ لا يمكن أن تبقى معلقة فيه فهي تسقط نحو أرضه بتأثير المجال الجاذب ، ويمنعها ظهر المقعد من السقوط فتنضغط عليه .

والفريقان محقان فيما يدعيان ولا توجد طريقة نظرية أو تجريبية تؤيد فريقا دون آخر .

والقوة التي يشعر بها ركاب الصاروخ يمكن أن تكون ناتجة عن تسارع الصاروخ أو عن المجال الجاذب لكتلة مادية « قريبة » .

والفرضيتان صحيحتان بالاستناد الى مبدأ التعادل .

ومبدأ التعادل كما هو واضح من الامثلة العديدة التي شرحناها هو أساس النظرية النسبية العامة التي كان همها الوحيد تحقيق التكافؤ التام بين مختلف الجمل المقارنة مهما كانت حركتها .

ووجد اينشتين في مبدأ التعادل حلا لكل من مفهومي الجاذبية والحركة المطلقة ، وأوضح مبدأ التعادل أن الحركة المتغيرة يمكن أن لا تكون حركة مطلقة كما ظنها نيوتن لانه من غير الممكن التمييز بين الحركة المتغيرة والمجال الجاذب .

* * *

الفصل الثالث

المتصل الزماني – المكاني ذو الابعاد الاربعة والنظرية النسبية العامة

ذكرنا في فصل سابق كيف عرف العالم مينكوسكي المتصل الزماني ــ المكاني ذا الابعاد الاربعة وسماه بالعالم .

وكانت كل نقطة من هذا العالم تسمى « حادثة » تحددها في هذا المتصل أربعة احداثيات ثلاثة منها للمكان ورابعة للزمن .

وتسمى المسافة الفاصلة بين حادثتين متجاورتين « بالمجال » (intervalle) ونرمز لها بـ (د ل) واذا رمزنا بـ ($س_1$ ، $س_2$ ، $س_3$ ، $س_4$) لاحداثيات « الحادثة » في الجملة « الرباعية » كان « المجال » بين حادثتين متجاورتين :

$$(د ل)^2 = (د س_1)^2 + (د س_2)^2 + (د س_3)^2 + (د س_4)^2 \quad (1)$$

وسبق أن بينا في حينه أن « المجال » بين حادثتين يكون مستقلا عن الجملة المقارنة الرباعية المختارة .

وخلص مينكوسكي من ذلك الى أن المتصل الزماني ــ المكاني ذا الابعاد الاربعة هو متصل « اوكليدي » . ونحن نعلم أن العنصر الاساسي في الهندسة الاوكليدية هو الخط المستقيم ، ويعرف الخط المستقيم في هذه الهندسة بأنه أقصر طريق يصل بين نقطتين .

بصورة مماثلة ينبغي أن تبنى هندسة المتصل الزماني ــ المكاني ذي الابعاد الاربعة على الخطوط المستقيمة التي تمثل أقرب بعد بين حادثتين والخطوط « العالمية » للاشعة الضوئية في هذا المتصل هي خطوط مستقيمة . كذلك يرسم الجسم المعزول عن كل تأثير خارجي مستقيما عالميا في المتصل « العالمي » .

ويبقى « المجال » (د ل) بين حادثتين ثابتا شرط أن نطبق على الاحداثيات (س١ ، س٢ ، س٣ ، س٤) تحويلات لورنتز ، وفي هذه الحالة تسمى الجمل الاحداثية« الرباعية » التي ترد اليها الحوادث « جملا عطالية » وهي جمل ساكنة بدلالة بعضها أو تتحرك بحركة مستقيمة منتظمة .

انما حينما ترد الحوادث الى جملة رباعية « لا عطالية » (حركتها متسارعة) وجدنا عندها أن الخط العالمي الذي ترسمه الحادثة (س١ ، س٣ ، س٣ ، س٤) والممثل لانتشار الشعاع الضوئي مثلا ، هو خط منحني . كذلك ترسم الحادثة الممثلة لحركة جسم معزول عن كل تأثير خارجي خطا عالميا منحنيا أيضا .

وتنبه اينشتين الى هذا الشذوذ الحادث في الجمل المتسارعة وقال بأن الجسم اذا ردت حركته الى جملة متسارعة لا يمكن أن يكون معزولا عن كل تأثير خارجي وانما يعادل رده الى هذه الجملة تسليط « مجال جاذب » عليه ، وعاد الى المصعد وأعطى المثال التالي :

تتخيل مصعدا يرتقي خلال الفضاء الرحيب البعيد عن كل تأثير مادي بتسارع ثابت وتصور اينشتين رجلا يتجول في الفضاء الخالي ويطلق من خارج المصعد رصاصة نحوه ، فتخترق الرصاصة جانبا منه وتمر خلاله وتنفذ من الجانب المقابل . فاذا نظر عالم داخل المصعد الى الثقبين الذين أحدثتهما الرصاصة في جداري المصعد وجد الثقب الثاني الذي خرجت منه الرصاصة ينخفض قليلا عن مستوى الثقب الاول الذي دخلت منه .

يعلل العالم الموجود داخل المصعد ، وليس لديه أية فكرة عن وضعه في الكون ، الحادثة بالشكل التالي : «المصعد ساكن على الارض حيث ترسم القذائف قطوعا مكافئة بحركة متغيرة ، ويعود سبب هذه الحركة

الى تأثير الجاذبية الارضية على الكتلة المقذوفة ، والرصاصة التي اخترقت غرفتي توا سارت على منحاها الطبيعي » . بينما يعلل عالم آخر داخل المصعد الظاهرة على نحو آخر اذ يقول : «نحن الآن في مكان خال من كل تأثير جاذب ويرقى مصعدنا بتسارع ثابت وتتحرك الرصاصة حركة مستقيمة منتظمة بالاستناد الى قانون العطالة ، ولكنها في الفترة الزمنية اللازمة لاختراق عرض المصعد بين جداريه كان المصعد يرتفع « الى الاعلى » مسافة معينة مما جعل الثقب الثاني الذي نفذت منه الرصاصة لا يقابـل الثقب الذي دخلت منه بل يـكون أقرب قليلا الى أرض المصعـد » .

ولا يستطيع أحد أن ينحاز الى أحد الرأيين لوجود التعادل التام بين الجاذبية والحركة المتغيرة (المتسارعة) .

وبعد لحظات وبينما يستمر المصعد في « صعوده » تنفذ ومضة ضوئية فجأة من خلال أحد الثقبين الذين أحدثتهما الرصاصة في جداري المصعد وتصدم الومضة الضوئية الجدار المقابل للثقب في نقطة تقع تحت مستويه بمسافة صغيرة جدا .

ويحار العلماء داخل المصعد لهذه الظاهرة الجديدة ويسألون العالم الذي اعتقـد بسكون غرفتهم على سطح الارض أن يعلل لهم هـذه الظاهرة ، فيلتزم هذا العالم الصمت وبعد فترة يقول : «لو قبلنا بنظرية التعادل بين الكتلة والطاقة أمكننا عندها تعليل الظاهرة :

الشعاع الضوئي الـداخل للغرفة هو عبارة عن موجة كهرطيسية تختزن قدرا من الطاقة الكهرطيسية وتملك هذه الطاقة كتلة عاطلة تساوي : $\frac{قد}{ن^{٢}}$ وبالاستناد الى مبدأ التعادل بين الكتلة العاطلة والكتلة الثقيلة وجب أن يؤثر مجال الارض الجاذب على الكتلة الثقيلة للشعاع الضوئي

فيحرفه عن خط انتشاره المستقيم ويحوله الى قطع مكافىء يلاقي الجدار المقابل في نقطة تقع تحت سوية الثقب » .

بينما ينبري نه عالم آخر ويقول : «كلا لسنا في مجال جاذب بل نحن في بقعة من الكون خالية من المادة ، ويرسم الشعاع الضوئي في هذه البقعة خطوطا مستقيمة ، ومصعدنا يرتفع الى الاعلى بحركة متسارعة بانتظام ، ويقطع الشعاع الضوئي المسافة بين الجدارين في حين ينتقل المصعد مسافة صغيرة الى الاعلى ، ويحق لنا أن نقول ان الشعاع الضوئي لا يرسم مستقيما في الجملة المتسارعة وانما يرسم فيها خطا منحنيا » .

ولا يستطيع أحد أن ينحاز الى أحد الرأيين لوجود التعادل التام بين الجاذبية والحركة المتغيرة (المتسارعة) .

وينتقل بعدها اينشتين الى مثـال جديد يوضح فيه تأثير الحركة المتسارعة (المتغيرة) في ركيزتي المتصل الزماني ــ المكاني ذي الابعاد الاربعة وهما الطول والزمن .

تخيل بقعة كونية بعيدة عن كل تأثير جذب ، وفرض أنه يوجد في هذهالبقعة قرص كبير دائري الشكل يمكنه الدوران حول محور عمودي على مستويه ومار من مركزه .

نعتبر جملة مقارنة « رباعية » عطالية (م) مقيدة بالبقعة الكونية الساكنة وجملة مقارنة « رباعية » (مَ) مقيدة بالقرص الدائر .

تكون الجملة (مَ) عطالية في الحالة التي يكون فيها القرص ساكنا وبعيدا عن تأثير الاجسام الجاذبة . والمتصل الزماني ــ المكاني ذو الابعاد الاربعة الممثل للقرص هو متصل اوكليدي . فاذا قسنا نصف قطر القرص وقسنا محيطه وقسمنا المحيط على طول القطر حصلنا عندها على العدد الثابت العالمي :

$$\pi = ٣,١٤١٥٠٠٠٠$$

نتصور الآن أن القرص أخذ بالدوران حول المحور ، وهنالك شخص يجلس في نقطة بعيدة عن مركزه : يشعر عندها هذا الشخص بقوة تدفعه نحو محيط القرص • يعلل ناظر موجود خارج القرص هذه القوة بأنها القوة النابذة الناشئة عن الحركة الدائرية للقرص ، بينما يعلل الشخص الجالس على القرص والجاهل تماما لحركته شعوره بهذه القوة الى تأثره بمجال جاذب تختلف طبيعته عن طبيعة مجال نيوتن ، ولكنه لا يأبه بهذه الفوارق لانه عالم بالنظرية النسبية العامة •

ويقوم الشخص الجالس على القرص بقياسات دقيقة للازمنة والاطوال وهو بعمله هذا يريد أن يصل الى تعريف صحيح لمفهومي الزمان والمكان بدلالة جملته (مَ) •

يبدأ بوضع ساعتين متماثلتي الصنع واحدة في مركز القرص والثانية في نقطة من محيطه ، فالساعتان ساكنتان في الجملة (مَ) وبعدهما النسبي ثابت في هذه الجملة . وتقضي النظرية النسبية الخاصة بتواقت الساعتين في الجملة مَ (جملة القرص) وعدم تواقتهما في جملة أخرى (جملة البقعة الكونية مثلا) •

يرى الناظر الساكن بدلالة البقعة الكونية (الجملة م) الساعة الموجودة في مركز القرص ساكنة بينما يرى الساعة الموضوعة على محيط القرص تتحرك ؛ وفي فترة زمنية صغيرة جدا يمكن اعتبار حركة ساعة المحيط حركة انسحابية منتظمة ، ويفرض عندها قانون تمدد الازمنة تأخر الساعة الموضوعة في المحيط عن الساعة الموضوعة في المركز • والناظر الجالس في مركز القرص الدائر هو ساكن بالنسبة للبقعة الكونية (م) فبالنسبة لهذا الشخص تكون الساعة الموضوعة على المحيط أبطأ من الساعة الموضوعة بجواره في مركز القرص ؛ ويزداد تباطؤ الساعة مع ازدياد سرعتها « الانسحابية » بدلالة الشخص الجالس في المركز • فاذا وضعنا

ساعات متماثلة في نقط مختلفة من القرص ازدادت سرعاتها بدلالة المركز بازدياد بعدها عن هذا المركز* ويؤدي ازدياد سرعة الساعة الى ازدياد تباطئها ويكون سير الساعات المتماثلة بطيئا كلما ازداد بعدها عن الساعة الموضوعة في مركز القرص • فلكل نقطة من القرص الدائر زمن خاص بها رغم كون البعد النسبي بين هذه النقط ثابتا بدلالة جملة القرص (مَ) •

وهذه الظاهرة الجديدة تشكل شذوذا ظاهرا عن النظرية النسبية الخاصة التي تفترض التواقت في مختلف نقط الجملة المقارنة الواحدة •

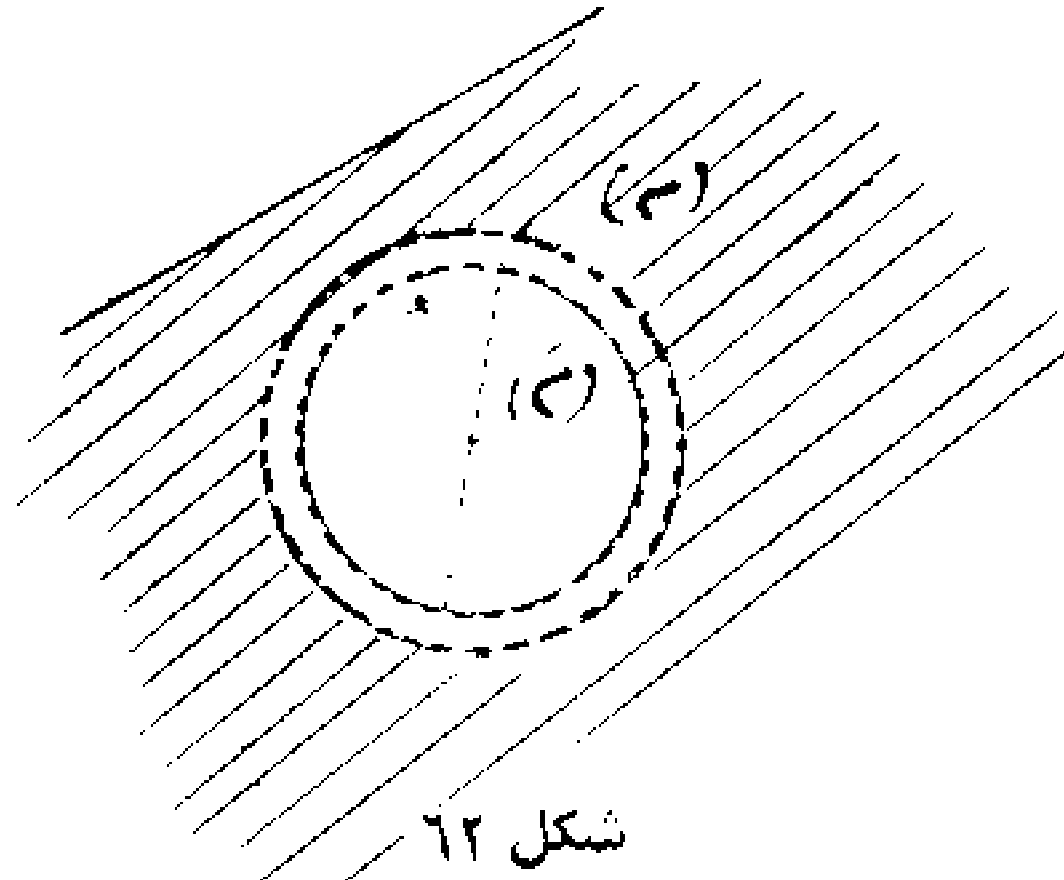
ويرجع اينشتين هذا الشذوذ الى قيام الجملة المقارنة المعتبرة بحركة متغيرة (دائرية منتظمة) أو بمعنى آخر لتأثرها « بمجال جاذب » •

ففي كل نقطة من قرص دائر أو بشكل أعم في كل نقطة من مجال جاذب تسير الساعة الموضوعة في هذه النقطة على منوال يعتمد على مكان هذه النقطة في المجال الجاذب وبالتالي يستحيل علينا وضع تعريف سليم للزمن أو للتواقت في ساعات متماثلة موزعة في نقط ثابتة من جملة مقارنة تتحرك بحركة متغيرة ، ويفقد مفهوم التواقت معناه الاساسي في جمل كهذه ، كما تفقد النظرية النسبية الخاصة ركيزة هامة من ركائزها • وتطبق النظرية النسبية الخاصة فقط في الجمل العطالية وهي الجمل التي لا وجود فيها أبدا لاي تأثير جاذب •

وبعد فشل قياساته الزمنية يحاول الشخص الموجود على القرص الدائر القيام ببعض القياسات المكانية ، فهو يستعمل مساطر قصيرة متماثلة يعتبرها واحدة لقياس أطواله ، وتنتقي هذه المساطر صغيرة بالنسبة

(*) السرعة الخطية في الحركة الدائرية تساوي جداء نصف القطر بالسرعة الزاوية (سر = ي ر) والسرعة الزاوية تتناسب مع عدد الدورات في الثانية (ي = ٢ π ن) والنقط المختلفة البعد عن مركز القرص تقوم كلها بعدد واحد من الدورات في كل ثانية (ن ثابت) بينما يختلف بعدها (ر) عن مركز القرص •

لنصف قطر القرص يذهب هذا الشخص الى حافة القرص ويحاول قياس محيطه ، فيضع المساطر مماسة للمحيط الواحدة بجانب الاخرى (شكل ٦٢) ويحصل بالنتيجة على قياس للمحيط يقدره هو بعدد المساطر التي لزمت لتغطية هذا المحيط . ويراقب الشخص الجالس في مركز القرص هذه



شكل ٦٢

العملية ، ولكنه لا يوافق الشخص الثاني على واحدته المستعملة في قياس الاطوال . فهو يقارنها بالمسطرة الموجودة بجانبه ، فيراها أقصر منها بقليل وذلك لان مسطرة المحيط تتحرك بدلالة المركز ، وتسبب الحركة في انكماشها . واذا قال الشخص الجالس على المحيط أنه حصل على قياس للمحيط يساوي ٣٢٠٠ واحدة طول أجابه عندها الشخص الجالس في المركز نعم يساوي المحيط ٣٢٠٠ واحدة انما من واحداتك أنت وهذه الواحدة هي أصغر من الواحدة التي اتفقنا عليها والتي ما زالت بحوزتي ، وعليه لا يساوي طول المحيط ٣٢٠٠ واحدة وانما ٣١٤٠ واحدة « مثلا » .

وينصرف بعدها الشخص الجالس فوق القرص لقياس قطر القرص ويضع المساطر « الواحدية » الواحدة تلو الاخرى من المركز حتى المحيط ، ويجد

بذلك قياساً للقطر ويقدره بعدد المساطر المستعملة في هذا القياس وليكن مثلا ١٠٠٠ مسطرة ، ولا يعارضه الشخص الجالس في مركز القرص فيما وصل اليه . وذلك لان هذه المساطر الموضوعة وفـق القطر تتجه عمودية على الحركة فلا يصيبها أي انكماش .

فاذا كان القرص ساكنا وجب أن تكون نسبة المحيط الى القطر مساوية $\frac{٣١٤٠}{١٠٠٠}$ = ٣,١٤ بينما في الحالة التي يكون فيها متحركا تصبح هذه النسبة مساوية $\frac{٣٢٠٠}{١٠٠٠}$ = ٣,٢ أي أكبر من π = ٣,١٤ .

ويوضح لنا المثال أعلاه أن المتصل الزماني ــ المكاني ذا الابعـاد الاربعة الممثل للقرص الدائر لم يعد متصلا اوكليديا .

والعناصر المحددة لهذا المتصل لم تعد كما ذكرنا سابقا المستقيمات والدوائر ، انما تحدده الخطوط المنحنية المسماة بالخطوط الجيوديزية (géodésiques) وينتشر الضوء في هذا المتصل على الخطوط الجيوديزية المنحنية .

فاذا انتخبنا نقطتين (ب) و (حـ) على سطح يساري (سطح كرة مثلا) كانت هنالك لا نهاية من الخطوط المنحنية يمكنها أن تصل النقطة (ب) الى النقطة (حـ) وتقع كافة هذه الخطوط على السطح اليساري والخط الجيوديزي للسطح هـو بالتعريف أقصر خط بين النقطتـين (ب) و (حـ) .

والسطوح اليسارية هي سطوح لا اوكليدية ، والخطوط الاكثر استقامة عليها هي الخطوط الجيوديزية .

أما السطح المستوي فهو سطح اوكليدي ، وأقصر مسافة بين نقطتين من هذا السطح هي المستقيم الواصل بين النقطتين ، فالخطوط الجيوديزية للسطوح المستوية هي خطوط مستقيمة .

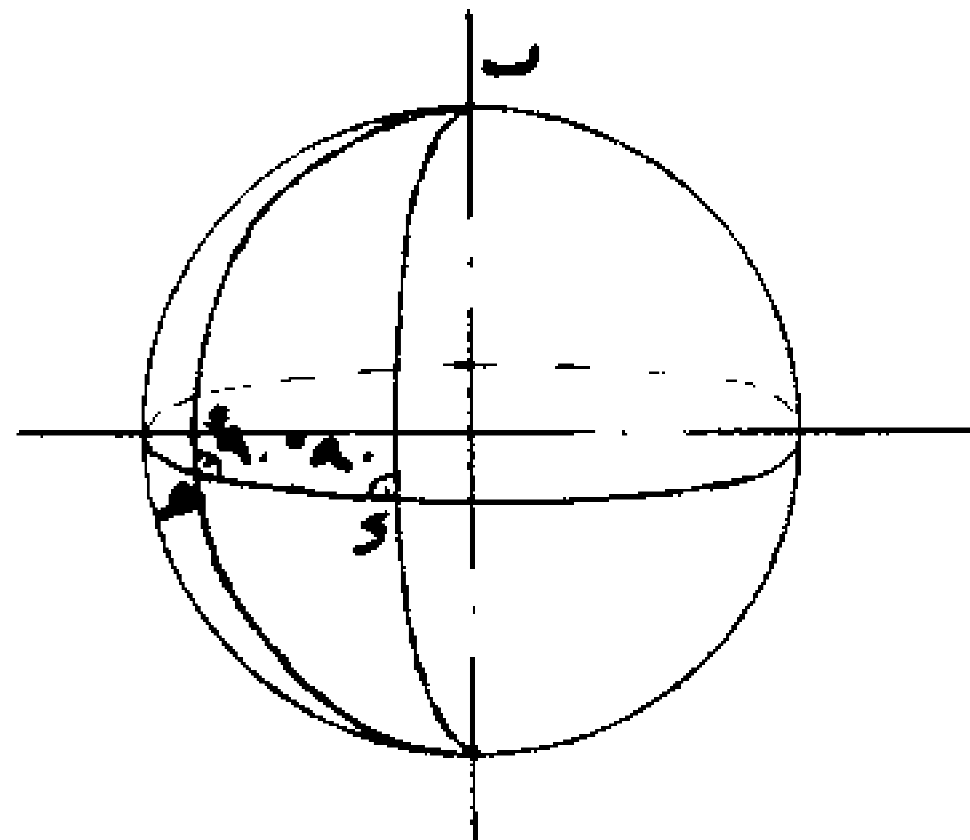
وأقصر مسافة بين نقطتين من سطح الكرة هو خط جيوديزي نحصل عليه بعد قطع الكرة بمستوٍ يمر من مركزها ومن النقطتين المعتبرتين • فالدوائر الكبيرة المرسومة على سطح الكرة هي خطوط جيوديزية • وخطوط الطول في كرتنا الارضية هي خطوط جيوديزية على سطح أرضنـــا •

ولا تطبق هندسة اوكليدس على منطقة واسعة من سطح الارض فاذا رسمنا مثلثا كبيرا قاعــدته في خط الاستواء ورأسه في القطب ، كان عندها مجموع زوايا المثلث المرسوم أكبر من ١٨٠ درجة (شكل٦٣) •

واذا رسمنا دائرة على سطح الكرة الارضية كانت نسبة محيطها الى قطرها أصغر من النسبة المقرة في هندسة اوكليدس وهي :

$$\pi = ٣,١٤٠٠٠$$

وعدم توافق خواص الاشكال الهندسية المرسومة على سطح الكرة مع هندسة اوكليدس يعود الى كون الارض يسارية السطح •



شكل ٦٣

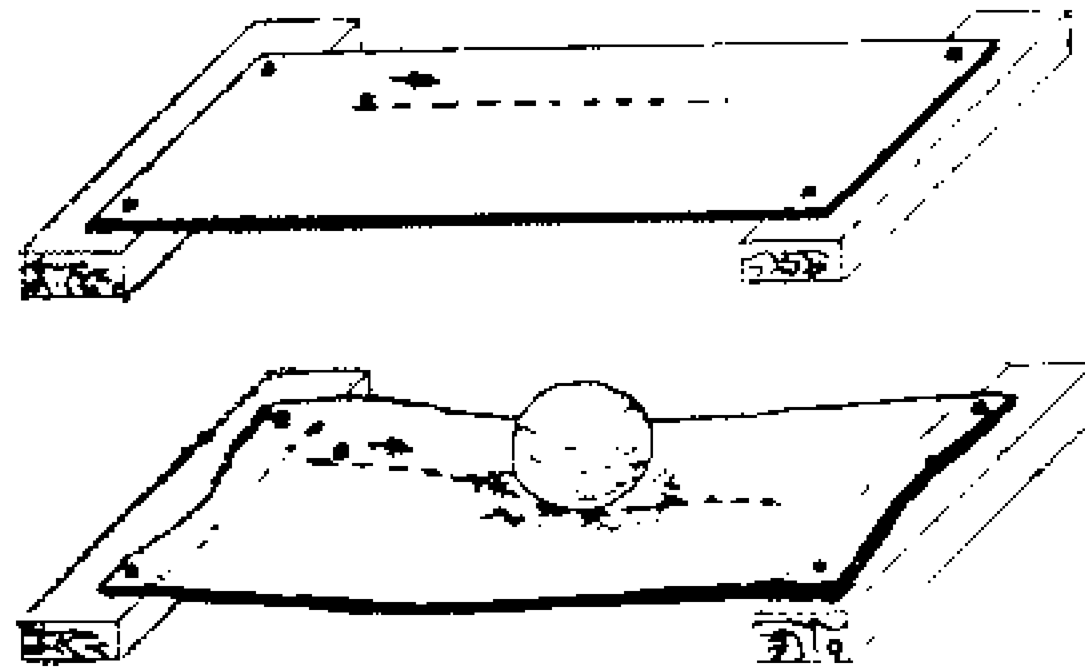
ويقول اينشتين :

« المتصل الزماني ـ المكاني ذو الابعاد الاربعة لبقعة من الكون خالية من المادة الجاذبة هو متصل اوكليدي ، يمثل فيه انتشار الاشعاعات الضوئية بخطوط « عملية » مستقيمة وتصلح فيه النظرية النسبية الخاصة .

وبمجرد ان نضع كتلة جاذبة في هذه البقعة او بمجرد ان تكتسب هذه البقعة حركة متغيرة يتحول عندها المتصل الزماني ـ المكاني ذو الابعاد الاربعة الممثل لها من متصل اوكليدي الى متصل لا اوكليدي وفي هذه الحالة ترسم الاشعاعات الضوئية مسارات « عملية » منحنية هي خطوط جيوديزية لهذا المتصل » .

ونوضح ذلك بالتشبيه التالي :

نتخيل قطعة مشدودة ومستوية من المطاط ، نضع فوقها كرة خفيفة . وندفعها دفعة صغيرة ، فترسم الكرة على السطح المستوي مستقيماً تقطعه بحركة منتظمة ونعبر عن ذلك بقولنا : ان الكرة البعيدة عن كل تأثير خارجي ترسم خطاً جيوديزياً (مستقيماً) على السطح المستوي (شكل ٦٤) . نضع فوق قطعة المطاط المشدودة جسماً ثقيلاً فيتحول عندها شكل القطعة بجوار الجسم الثقيل من سطح مستوٍ الى سطح



شكل ٦٤

يساري . فاذا كانت الكرة الخفيفة فوق القطعة في منطقة بعيدة عن الكتلة الثقيلة ثم دفعناها ، سارت عندها الكرة على خط مستقيم بحركة منتظمة ولكنها تنحرف عن مسارها المستقيم بمجرد اقترابها من الكتلة الثقيلة وترسم خطا منحنيا بجوار الكتلة الثقيلة ثم تخرج من هذا الجوار وتعود الى مسارها المستقيم عندما تصبح بعيدة عن الكتلة الثقيلة .

ووجد اينشتين في هذه الظاهرة حلا لمشكلة الجاذبية .

والجاذبية التي رآها اينشتين تخالف جاذبية نيوتن تمام المخالفة فالجاذبية في نظر اينشتين ليست « قوة » والفكرة القائلة بأن هنالك قوة تجاذب متبادلة بين جسمين ماديين هي في رأي اينشتين نوع من الخداع غير المطابق للحقيقة في تمثيل ميكانيك الكون ، ويصف اينشتين سلوك الاجسام في مجال الجاذبية كالكواكب السيارة مثلا لا على أساس قوة الجذب بل على أساس الممرات والمسالك التي تسلكها والتي تحددها الكتل المادية الجاذبة في المتصل المكاني ــ الزماني ذي الابعاد الاربعة .

ويرى اينشتين بأن الجاذبية ما هي الا نوع من العطالة . وحركة الكواكب تعتمد على عطالتها الذاتية . والمسالك التي تسلكها تحددها الخواص القياسية للمتصل الزماني ــ المكاني ذي الابعاد الاربعة .

ويقارن المؤلف لنكولن بارنت (Lincoln Barnett) في كتابه « العالم وأينشتين » بين كل من العالمين اينشتين ونيوتن من حيث نظرتهما للكون فيقول :

« لتوضيح الفوارق بين أفكار نيوتن عن الجاذبية وآراء اينشتين فيها ، نصورها بمثال صبي يلعب بالحجارة في رقعة من مدينة ، أرضها غير ممهدة ، بل تحوي مرتفعات ومنخفضات بسيطة نسبيا واذا افترضنا شخصا يراقب هذا الصبي من عمارة مرتفعة بقدر عشرة ادوار ، فان هذا المراقب لا يستطيع أن يلاحظ هذه المرتفعات والمنخفضات ، وعندما يراقب هذه

الحجارة فانها تبدو له وهي تسلك بعض الطرق وتتفادى البعض الآخر ، فهو يفترض وجود « قوة » جعلت الحجارة تبتعد عن بعض الجهات ، وتقترب من بعضها الأخر ، ولكن أي مراقب آخر على سطح الارض ذاتها ، يستنتج بأن تضاريس المجال الارضي تتحكم في مسارات الحجارة . وفي هذه القصة الخيالية نجد أن نيوتن هو المراقب العلوي من العمارة الذي يتخيل أنه لا بد من وجود قوة تؤثر في حركة الحجارة . وانيشتين هو المراقب الارضي الذي لا يرى داعيا لافتراض القوة . ومن ذلك فان قوانين اينشتين عن الجاذبية تصف بكل بساطة خواص المتصل الزماني ـ المكاني ذي الابعاد الاربعة » .

وبرهن اينشتين أن المجال الجذب الحقيقي (كتلة مادية) أو الظاهري (جملة متسارعة) يؤثر في المتصل الزماني ـ المكاني ذي الابعاد الاربعة فيجعله لا أوكليديا .

وترد الظواهر الطبيعية في هذا المتصل اللااوكليدي الى جمل مقارنة خاصة تعرف باسم جمل غوص (Gauss) وتأخذ القوانين الفيزيائية شكلا متماثلا في مختلف هذه الجمل مهما اختلفت أشكالها . وتحوي هذه القوانين على امثالات يحددها الشكل الهندسي للمتصل اللا اوكليدي الذي تحدد خواصه المجالات الجاذبة .

وترسم الاجسام المتحركة في هذا المتصل خطوطه الجيوديزية . واستنتج اينشتين من هذه المفاهيم الجديدة نظرية جديدة في الجاذبية العالمية كانت نتائجها بشكل عام مطابقة للنتائج التي حصل عليها نيوتن الا أنها تمكنت من حل كافة المعضلات الفلكية التي فشلت نظريات نيوتن في تعليلها .

وسوف نورد في الفصل التالي بعض الامثلة على ذلك .

ونستخلص من الامثلة العديدة التي أوردها اينشتين أن المتصل

الزماني ـ المكاني ذا الابعاد الاربعة الممثل لبقعة كونية يحتلها مجـال جاذب (حقيقي أو ظاهري) هو متصل لا اوكليدي . وفي هذه البقعة يختلف سير الساعة بحسب وضعها كما يختلف قياس الطول الواحد بحساب مكانه . فلا بد لنا من أن نسأل : يبدو اذن أن ركائز المتصل الزماني ـ المكاني الذي بنينا عليه كافة المفاهيم الطبيعية في النظرية النسبية الخاصة قد تزعزعت وأصبحت واهية بحاجة الى ترميم تصدعاتها ؟ وهذا هو بالفعل ما شعر به اينشتين ذاته لذلــك رأيناه يقلب مفاهيم المكان والزمان ليعللها هذه المرة بطريقة جذرية تفوق بعمقها كافة التعميمات السابقــة .

فأن : « لم يعد هنالك أي لزوم للاحداثيات الديكارتية الاربعة المألوفة (س ، ع ، ص ، ز) لأن الجمل الرباعية المتعامدة والمتماسكة لم تعد صالحة لتمثيل الحوادث الطبيعية تمثيلا صحيحا . فهذه الجمل تعتمد على عناصر أساسية أهمها الخط المستقيم والدائرة . والمستوى الخ ... وقد زالت هذه العناصر من المتصل الزماني ـ المكاني في حالة وجود مجال جاذب . وعليه ينبغي تمثيل المتصل وصياغة قوانينه دون اعتماد هندسة معينة . وقد وجدت ضالتي في نظريات غوص (Gauss) وريمــن (Rieman) الخاصة بالسطوح اليسارية ذات الابعاد المتعددة .

والمتصل الزماني ـ المكاني الذي نحن بصدده هو سطح يسري ذو اربعة أبعاد فهو يمكن أن يعين بأربعة وسطاء ثلاثة منها للمكان ورابعة للزمــن .

ولا ترمز هذه الوسطاء الى أي مدلول فيزيائي انما يفترض فيها فقط أن تأخذ قيما متقاربة في حالة تمثيلها لحدثتين متقاربتين . وجمل المقارنة المستعملة في هندسة غوص (Gauss) ليست جملا متماسكة كالجمل الكرتيزية . ولكنها تصلح لان تأخذ فيها القــوانين الطبيعية أشكالا

متماثلة ، وتحتوي هذه القوانين على امثلات تتعلق بشكل جملة غوص المستعملة ، وتتكيف هذه الجملة بدورها مع خواص المتصل الزماني — المكاني تلك الخواص التي يحددها المجال الجاذب ، فالامثلات التي تدخل في القوانين الفيزيائية هي اذا امثلات يحددها المجال الجاذب وتسمى امثلات جاذبية .

والمتصل الزماني—المكاني الخالي من أي مجال جاذب هو متصل اوكليدي ذو أربعة أبعاد يمكن رده الى جملة مقارنة كرتيزية متماسكة لها أربعة محاور متعامدة . واذا نشأ مجال جاذب في هذا المتصل حوله عندها الى متصل لا اوكليدي . وتحولت الجملة المقارنة المقيدة به الى جملة غوص تتكيف مع شكل هذا المتصل فهي تتحدد اذن بالمجال الجاذب . وتسلك الاجسام المعزولة والمتحركة في هذا المتصل الجديد خطا من خطوطه الجيوديزية المنحنية .

الفصل الرابع

التحقيقات التجريبية للنظرية النسبية العامة

١ ـ حركة الكواكب السيارة :

ذكرنا في حينه كيف استنتج العالم كبلر (Kepler) من مشاهداته الفلكية القوانين الثلاثة لحركة الكواكب . وبينا كيف تم للعالم نيوتن (Newton) صياغة قانونه العام في الجاذبية العالمية بالاعتماد على المبادىء التجريبية التي كشفها كبلر . وقال نيوتن : ان الاجسام المادية على اختلاف أنواعها وأشكالها وأمكنتها في الكون تقوم بحركات متماثلة عندما تخضع لشروط تحريكية معينة . فاذا خضع الجسم المتحرك لقوة مركزية تتجه نحو جسم ثابت على الخط الواصل بينه وبين الجسم المتحرك . وتتناسب عكساً مع مربع البعد بين الجسمين . قام عندها هذا الجسم بحركة تشبه حركة الكوكب السيار .

والقوى المركزية التي تخضع لها الكواكب السيارة هي قوى جذب الشمس لهذه الكواكب . وتعطى هذه القوة بالعلاقة :

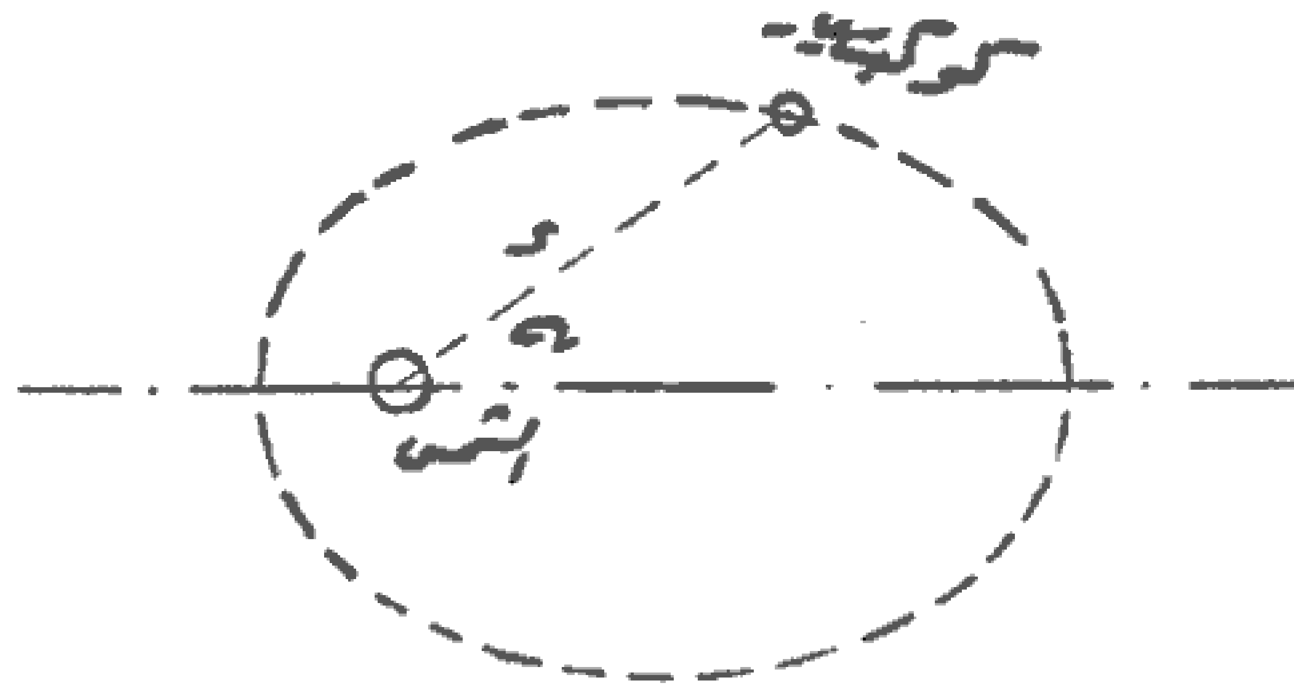
$$\text{ف} = \text{ث}\,\frac{\text{ك} \cdot \bar{\text{ك}}}{\text{ر}^{2}}$$

وترمز (ث) الى ثابت الجاذبية و ($\bar{\text{ك}}$) الى كتلة الكوكب و (ك) الى كتلة الشمس و (ر) الى البعد بين الكوكب والشمس .

وأدت الدراسة الرياضية العالية لهذه الظاهرة الى الدستورين التاليين :

$$\frac{د^{٢} ب}{د ه^{٢}} + ب = \frac{ك}{ط^{٢}} \; (١) ، \quad ر^{٢} \frac{د ه}{د ز} = ط \quad (٢)$$

وترمز (ب) الى مقلوب البعد بين الجسمين ($ب = \frac{١}{ر}$) كما ترمز (ه) الى الزاوية بين الخط الواصل بين الكوكب والشمس ومحور ثابت يمر من الشمس (شكل ٦٥) وترمز (ك) الى كتلة الشمس الجاذبة و (ط) الى مقدار ثابت يساوي ضعف السطح الذي يمسحه المستقيم الواصل بين الكوكب والشمس في فترة زمنية (د ز) ◦ وتمثل المعادلة (١) قطعا ناقصا مستويا ثابتا تقع الشمس الجاذبة في أحد محرقيه (شكل ٦٥) ◦



شكل ٦٥

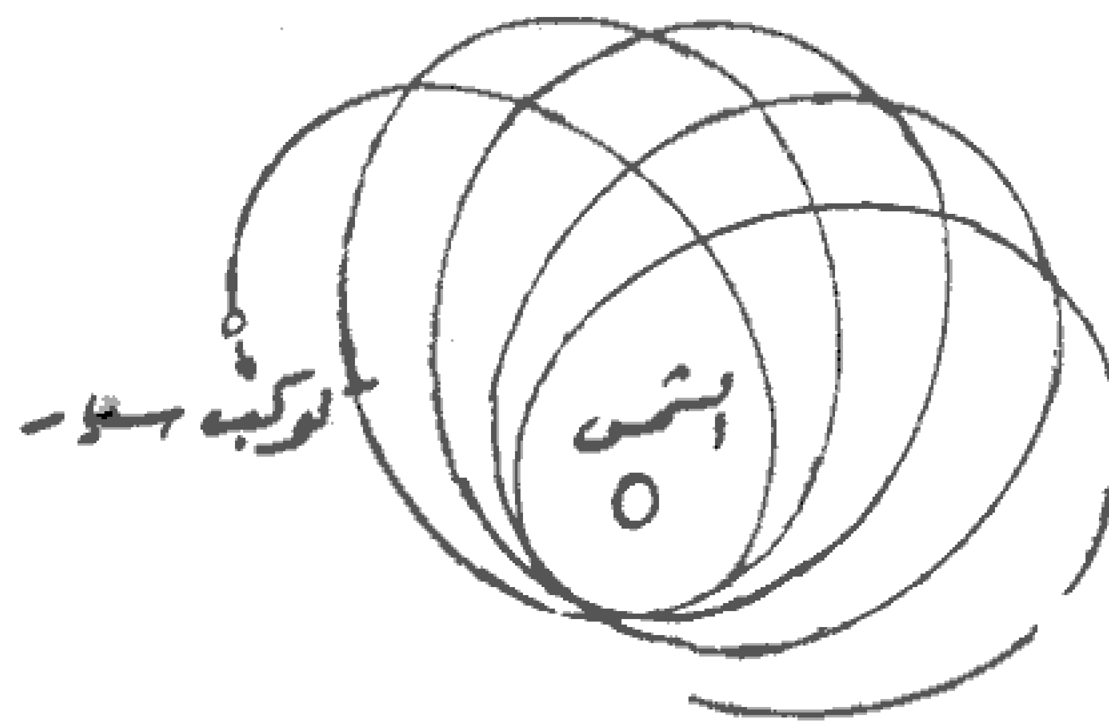
ونجح نيوتن بواسطة المعادلتين (١) و (٢) في تعليل حركة الاجرام السماوية على اختلاف أنواعها ◦ وذكرنا في حينه كيف تبين لعلماء الفلك بعد نيوتن أن المدار الناقصي للكوكب السيار لا يبقى ثابتا وانما يدور محوره في مستويه وحول الشمس ، ويرسم طرفه دائرة تقع الشمس في مركزها ◦

وعجب العلماء الكلاسيكيون لهذه الظاهرة الغريبة ، وحاولوا تعليلها بالاستناد الى نظريات نيوتن • فقال بعضهم بأن الكوكب السيار لا يخضع فقط لقوة جذب بالشمس وانما تؤثر عليه أيضا أجرام سماوية أخرى بقوى تكون ضئيلة بالنسبة لجذب الشمس ولكنها رغم ضآلتها تحدث بعض الانحراف في مدار الكوكب وتؤدي الى ذبذبة محوره •

وقام العالم الرياضي الفلكي لوڤرييه (Leverrier) بحسابات دقيقة للغاية تبين بنتيجتها أن التأرجح المحسوب لا يطابق التأرجح المشاهد •

ويكون المدار الناقصي في معظم الكواكب السيارة قليل التفلطح الى حد يمكن الباسه بالدائرة وفي هذه الحالة يصعب جدا مشاهدة تأرجح المحور •

واكتشف الكوكب السيار عطارد (Mercure) وهو أقرب الكواكب للشمس ومساره الناقصي كبير التفلطح ، وتبين لعلماء الفلك أن محور المسار يتأرجح بزاوية قدرها ٥٧٤ ثانية (أي ما يعادل ٩َ و ٣٤ً) في القرن الواحد (شكل ٦٦) • وحسب لوڤرييه (Leverrier) القيمة النظرية لهذا التأرجح بوجود بعض الاجسام الجاذبة ، فوجدها تساوي ٥٣١



شكل ٦٦

ثانية (أي ٨َ و ٥١ً) في القرن الواحد ، فكان الفرق بين الواقع المشاهد والقيمة النظرية ضئيلا جدا يساوي ٤٣ ثانية في القرن الواحد •

وكان هذا الفارق البسيط كافيا لاثارة الشكوك حول صحة نظرية نيوتن في الجاذبية العالمية • وما أن فرغ اينشتين من وضع أسس نظريته الجديدة في الجاذبية حتى قام بدراسة حركة جسم مادي حر لا يخضع لاية قوة خارجية في المتصل الزماني ــ المكاني ذي الابعاد الاربعة الــذي يحدده مجال الشمس الجاذبة وحصل بعد مناقشات رياضية عالية على العلاقتين :

$$\frac{\text{د}^{٢}\,\text{ب}}{\text{د}^{٢}\,\text{ه}} + \text{ب} = \frac{\text{ك}}{\text{ط}^{٢}} + ٣\,\text{ك}\,\text{ب}^{٢} \quad (٣) \qquad \text{ب}^{٢}\frac{\text{د ه}}{\text{د ل}} = \text{ط} \quad (٤)$$

وترمز (ك) الى كتلة الشمس و (د ل) للبعد بين حادثتين (المجال) تقابلهما فترة زمنية (د ز) وترمز باقي الاحرف الى ما رمزت اليه في علاقتي نيوتن (١) و (٢) •

ونلاحظ التشابه الكبير بين علاقتي نيوتن وعلاقتي اينشتين وتحوي علاقة اينشتــين (٣) حدا اضافيــا (٣ ك ب٢) لا تحويه علاقــة نيوتن (١) • كما استبدل اينشتين في علاقته (٤) الفترة (د ز) الموجودة في علاقة نيوتن (٢) بالمجال (د ل) •

وتمثل العلاقة (٣) قطعا ناقصا مستويا يتأرجح محوره بزاوية قدرها ٤٢َ و ٥٤ً في القرن الواحد ، وهذا القطع هو الخط الجيوديزي للمتصل الزماني ــ المكاني ذي الابعاد الاربعة المحدد بالمجال الجاذب للشمس •

واذا قمنا بحسابات مماثلة لمختلف المجالات الجاذبة المــؤثرة على الكوكب «عطارد» والتي تحدد خواص المتصل الزماني ــ المكاني الذي

يتحرك فيه هذا الكوكب ، وجدنا أن محور مداره يتأرجح في القرن الواحد بزاوية تساوي ٥٧٣ ثانية .

وكانت هذه النتائج النظرية المتعلقة بتأرجح محور مدار الكوكب عطارد دعما كبيرا للنظرية النسبية العامة .

ويفكر عمداء اليوم في اطلاق أقمار صناعية الى ارتفاع كبير عن سطح الارض لترسم هذه الاقمار قطوعا ناقصية كبيرة التفلطح تقع الارض في أحد محرقيها . فاذا كان بعد حضيض (Periphélie) مدار القمر عن الارض ٣٥٠٠ كيلو مترا قام عندها القمر بـ (٥٤٠٠٠٠) دورة حول الارض في قرن واحد (عوضا عن ٤١٤ دورة يدورها الكوكب عطارد حول الشمس في هذه الفترة) .

وفي هذه الحالة قد يتأرجح محور مدار القمر الصناعي بزاوية ١٣٠٠ ثانية عوضا عن الـ ٥٧٤ ثانية التي يتأرجحها محور مدار عطارد حول الشمس . وفي هذه الحالة قد يكون التحقق من صحة النظرية النسبية العامة سهلا وحاسما .

٢ ــ انحراف الاشعة الضوئية :

بينا في الفقرة الاولى نجاح نظرية اينشتين الجديدة في تعليل تأرجح محور مدار عطارد ، وكانت هذه الظاهرة الطبيعية معروفة قبل اينشتين فأتت نظريته محققة لظاهرة لم تكن مجهولة . ويقول الفيلسوف الفرنسي الكبير هنري بوانكاريه (Henri Poincarré) « لا تقدر القيمة الحقيقية للنظرية الجديدة بمدى تحقيق هذه النظرية لظواهر معروفة بل تقدر هذه النظرية بقدر ما تتنبأ به عن ظواهر مجهولة وتنجح من ثم في تحقيقها » .

وتأرجح محور مدار الكوكب عطارد كانت ظاهرة قديمة تحتاج الى

نظرية جديدة لتعليلها ، ووضع اينشتين نظريته النسبية العامة وانبثقت عنه نظرية جديدة في الجاذبية حققت تأرجح محور المدار .

ولم يكن اينشتين يفكر في تأرجح المحور عندما وضع نظريته النسبية العامة فهي لم توضع بغية تعليل ظاهرة واحدة ورغم هذا لا يحق لنا البت في صحة هذه النظرية أو عدمها بمجرد مطابقتها لظاهرة فردية معروفة .

وعندما وضع اينشتين نظريته النسبية العامة عام ١٩١٦ كان من المسلم به عندها أن الاشعة الضوئية تنتشر في الكون على خطوط مستقيمة .

ودرس اينشتين المتصل الزماني ــ المكاني ذا الابعاد الاربعة وبرهن أنه لا اوكليدي ولا وجود للخطوط المستقيمة فيه . وذهب من ذلك الى أن الضوء الذي ينتشر في فضاء تحتله كتلة مادية جاذبة لا يمكن أن يسير على خطوط مستقيمة وانما يسلك خطوطا منحنية تعرف بالخطوط الجيوديزية للمتصل الزماني ــ المكاني ذي الابعاد الاربعة .

فاذا انبعث شعاع ضوئي من نجم بعيد ومر هذا الشعاع بجوار الشمس وجب أن يسلك ممرا خاصا ، هو أحد الخطوط الجيوديزية للمتصل الزماني ــ المكاني ذي الابعاد الاربعة الذي يحدده المجال الجاذب لكتلة الشمس ، والخط الجيوديزي هذا لا يمكن أن يكون مستقيما وانما هو في الحقيقة خط منحني ، فاذا نظر شخص من الارض نحو النجم بدا له هذا الاخير في وضع ظاهري يختلف عن وضعه الحقيقي .

وحادثة انحراف الشعاع الضوئي الوارد من النجم والمار بقرب الشمس حادثة تنبأت عن حدوثها النظرية النسبية العامة لاينشتين وكانت ظاهرة مجهولة ، فاذا تحققت تجريبيا كان في تحقيقها دعم هائل لنظرية

اينشتين تفوق قيمته الدعم الذي لحقها بنتيجة تفسيرها تأرجح محور مدار عطـارد .

ومن المستحيل تحقيق ظاهرة انحراف الشعاع الضوئي في شروط تجريبية عادية لاننا لا نستطيع النظر الى نجم تمر اشعاعـاته الضوئية بجوار الشمس الساطعة لكون شدة اضاءة هذه الاخيرة تحول بيننا وبين رؤية النجم .

وانتظر العلماء حلول كسوف كلي للشمس حتى تسمح الشمس المكسوفة برؤية النجم ، وحدث الكسوف المرتقب في ٢٩ أيـار عام ١٩١٩ وذهبت بعثتان انكليزيتان فلكيتان ، الاولى الى افريقيا الشمالية والثانيةالى البرازيل ، والتقطتاصورا لنجم معينأثناء الكسوف ، ونشرت الصور الفوتوغرافية الملتقطة في السادس من شهر تشرين الثاني عام ١٩١٩ وكانت النتائج التي حصلت عليها البعثتان مطابقة (في حـدود التجريب) لنبوءة النظرية النسبية العامة ، فقد حصلت البعثة الاولى على زاوية انحراف قيمتها :

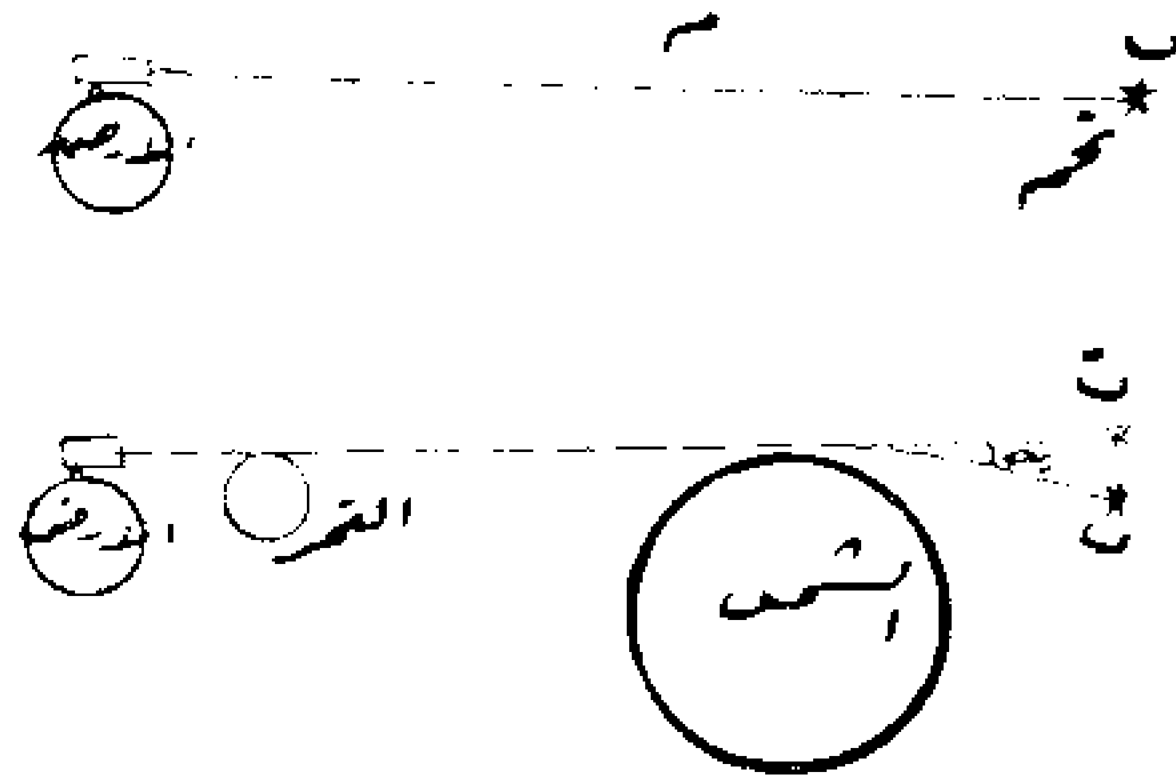
ه = ١,٩٨ ± ٠,١١٢ ثانية

وحصلت البعثة الثانية على زاوية انحراف قيمتها :

ه = ١,٦١ ± ٠,٣٠ ثانية

ويبين الشكل (٦٧) التعليل النظري للظاهرة .

نفرض النجم في الوضع (ب) والشمس بعيـدة عن الاشعاعات الضوئية الواردة منه ، ويكون في هذه الحالة المتصل الزماني ـ المكاني ذو الابعاد الاربعة اوكليديا وتنتشر فيه الاشعاعات الضوئية الواردة من النجم على خطوط مستقيمة متوازية منحاها (م) ويرى عنـدها النجم في وضعه الحقيقي (ب) وعندما تقترب الشمس من الاشعاعات



شكل ٦٧

الضوئية الواردة من النجم يصبح عندها المتصل الزمـاني ـ المكاني لا اوكليديا وتسلك عندها الاشعاعات الضوئية الواردة من النجم مسلك منحنية في الخطوط الجيوديزية للمتصل اللااوكليدي . ويرى عندها النجم في وضع يقع على المماس للخط الجيوديزي والممتد على خط النظر ويكون الوضع الظاهري للنجم هو الوضع (ب َ) والزاوية (ه) بين المستقيمين تمثل انحراف الشعاع الضوئي الوارد من النجم .

وطبق اينشتين نظريته على الظاهرة فكانت علاقة زاوية الانحراف هي :

$$ه = \frac{٤ ك}{ر}$$

وترمز (ك) الى كتلة الشمس و (ر) لنصف قطر الشمس .

وتقدر كل من (ك) و (ر) بواحدات خاصة تحددها الواحدات القياسية المستعملة في الميكانيك النسبي . وكانت زاوية الانحراف الناتجة تساوي :

ﻫ = ١,٧٥ ثانية

وهي كما نرى تطابق نتائج مشاهدات البعثتين الانكليزيتين ضمن حدود خطأ التجريب .

وبهذا النجاح الباهر للنبوءة العلمية الجديدة اعتبرت النظرية النسبية العامة ركيزة أساسية من ركائز العلوم الفيزيائية .

وتوصل العالمان كمبل (Camptell) وترومبلر (Trumpeer) أثناء كسوف عام ١٩٢٢ الى مشاهدات أدق من مشاهدات عام ١٩١٩ وحصلا على زاويتي انحراف :

الاولى : ﻫ = ١,٧٢ ± ٠,١١ ثانية
والثانية : ﻫ = ١,٨٢ ± ٠,١٥ ثانية

وهي كما نرى مطابقة كل المطابقة للزاوية النظرية :
ﻫ = ١,٧٥ ثانية

٣ ـ تأثير المجال الجاذب على سير الزمن :

تنبأ اينشتين أيضا في نظريته النسبية العامة بتأثر سير الساعات عند وضعها في مجال جاذب .

يقول اينشتين : « اذا نقلت ساعة الحائط من مكتبي الى سطح الشمس تبدل منوال سيرها وأخذت تبطئ » . ويعيد اينشتين هذا التباطؤ الى ازدياد المجال الجاذب .

كل مجال جاذب حقيقي أو ظاهري يؤثر على « فترة حادثتين » وتقصر فترة الحادثتين بازدياد المجال الجاذب .

ووجدنا في مثال القرص الدائر كيف أن الساعات الموضوعة في نقط مختلفة من هذا القرص تشير الى أزمنة متباينة ؛ وتؤخر هذه الساعات كلها عن الساعة الموضوعة في مركز القرص .

ونظرا للتعادل التام بين الجاذبية والحركة المتسارعة يكون لكتلة جاذبة موضوعة في مركز القرص الساكن مفعول معادل للحركة الدائرية المنتظمة للقرص •

وأجرى العالم ادينغتن (Eddington) حسابات عـلى قرص ساكن نصف قطره خمسة أمتار وضعت في مركزه كتلة ٥ طن فوجد بنتيجة الحساب أن النسبة بين محيط القرص وقطره لم تعد مساوية للعدد (π) وحصل الاختلاف في العدد الخامس والعشرين بعد الفاصلة • والاختلاف على ما يبدو صغير للغاية ولكنه اختلاف ذو شأن لان العلماء الرياضيين قد توصلوا الى تعيين ٧٠٠ عدد بعد الفاصلة للعدد الأصم (π) •

وقد ذكرنا في حينه أن كل ذرة من الجسم المادي تقوم باهتزازات كاملة حول وضع توازنها . ولكل ذرة مادية دور اهتزاز خاص بها •
ويعين دور الاهتزاز من طيف المادة بواسطة خطوط الامتصاص الموزعة في الطيف . ويقابل كل خط امتصاص موجة معينة . ويتناسب دور الاهتزاز طردا مع طول الموجة •

وأجرى اينشتين عام ١٩١٧ حسابات تختص بتأثير الكتلة الجاذبة على دور الاهتزاز . وحصل في النتيجة على العلاقة التالية :

$$\text{د ز} \qquad = ١ + \frac{\text{ك}}{\text{ر}}$$

وترمز (د زَ) الى دور اهتزاز الذرة عندما تهتز على سطح الارض و (د ز) الى دور اهتزازها عندما تهتز فوق سطح كوكب آخر كتلته (ك) ونصف قطره (ر) •

فاذا طبقنا العلاقة أعلاه على ذرة معينة موجودة في جو الشمس ينتـــج :

$$\frac{د ز}{د \bar{ز}} = ١ + \frac{١٦٤٧}{٦٩٧٠٠٠} = ١٫٠٠٠٠٠٠٣١٣$$

ويعني ذلك أن دور اهتزاز الذرة على سطح الشمس يبدو أكبر من دور اهتزازها على سطح الارض ، ويؤدي ذلك الى انتقال ضعيف للخط الطيفي الممثل لهذه الذرة نحو الامواج الطويلة أي نحو الاحمر .

والنسبة بين الدورين على سطح الشمس وعلى سطح الارض هي على ما يبدو قريبة جداً من الواحد ، ويستحيل بالقياسات الطيفية الدقيقة تحديد الانتقال الضعيف لخط الطيفي . وفي عام ١٩٢٧ أجرى العالم ادامز (Adams) قياسات دقيقة على النجم المسمى « رفيق الشعري اليمانية (Compagnon de Sirius) وهو نجم قزم أبيض تؤلفــه مادة مركزة كثافتها كبيرة . حجمها يساوي تقريبا حجم الارض بينما تساوي كتلتها كتلة الشمس ، مما يجعل كثافتها تساوي ٠٠٠ ١٥٠ مرة كثافة الماء . أي أن كتلة لتر واحد من مادة هذا النجم تساوي كتلة ١٥٠ طن من الماء موجودة على سطح الارض .

ويولد هذا النجم في جواره مجالا جاذبا قويا تكون فيــه النسبة $\frac{ث}{ر}$ كبيرة وأكبر بكثير منها في جوار الشمس . وتعطي عندها الدراسة النظرية انتقالا محسوسا للخطوط الطيفية نحو المنطقة الحمراء . وقاس ادامز (Adams) هذه الانتقالات فوجدها مطابقة تماما للنبوءة النظرية .

وسمي الانتقال الطيفي هــذا « بظاهرة اينشتين » واعتبرت هذه الظاهرة دعامة جديدة للنظرية النسبية العامة . وساعدت ظاهرة اينشتين في حساب كتل عــدد كبير من الاجرام الســماوية وخاصة منها النجوم الثــابتة .

وفي عام ١٩٦٠ قام عالمان فيزيائيان في جمعة هارفرد (Harvard)

في الولايات المتحدة وهما باوند (R.V. Pound) وريبكا (G.A. Rebka) في احداث ظاهرة اينشتين على سطح الارض ، وذلك بتجارب تمت على اشعاعات « غاما » المنبعثة من « الكوبالت المشع ٥٧ » عندما دفعوا هذه الاشعاعات من قاعدة برج ارتفاعه ٢٠ متر الى أعلاه : فانتقلت موجة هذه الاشعاعات « المسرعة » نحو الاحمر دالة على ازدياد طولها وبالتالي على ازدياد دور اهتزازها .

وتعود بنا فكرة تمدد الزمن بتأثير المجال الجاذب (الظاهري أو الحقيقي) الى مثالين ذكرناهما في النظرية النسبية الخاصة .

أعطينا مثال سائق القطار الذي ادعى أمام طومكنز أنه يملك سلطة اطالة الحياة ويعلل ذلك بتسارع وتباطؤ القطار . يتعرض راكب القطار أثناء تغير الحركة الى مجالات جاذبة تؤثر بدورها في الساعات (المعدنية منها والبيولوجية كنبضات القلب مثلا) فيؤدي تباطؤها الى بقاء الراكب شابا في حين يشيخ أولاده وأحفاده القاطنين على سطح الارض بعيدا عن المجال الجاذب المعادل لتغير الحركة .

وأعطينا أيضا مثال رحالة لانجفين (Voyageur de Langevin) ويمكن تعليل ظاهرة اطالة حياة ركاب الصاروخ بتأثير المجالات الجاذبة .

فالصاروخ ومن في داخله يتعرضون خلال فترات التسارع والتباطؤ الاربعة التي ذكرناها الى مجالات جاذبة معادلة لهذه الحركات المتغيرة . وتؤثر هذه المجالات في تأخير سير الساعات المعدنية أو البيولوجية أو الذرية الموجودة في الصاروخ ، ويحافظ الركاب على شبابهم بينما يشيخ أولادهم وأحفادهم الباقون على الارض بعيدا عن هذه المجالات .

الخـلاصـة :

بعد هذا العرض السريع لنظريات اينشتين يمكننا تلخيص مضمونها على النحو التالي :

١ ـ عللت نظريات اينشتين ظواهر طبيعية كانت مكتشفة من قبل وامتازت عن سواها من النظريات بكونها أعطت هذه الظواهر تعليلات أدق وأوضح من تعليلات النظريات الاخرى .

٢ ـ تمكنت نظريات اينشتين من تعليل ظواهر طبيعية لم توفق الى تعليلها النظريات الاخرى . نذكر منها :

آ ـ تجربة ميكلسون ومورلي .
ب ـ تأرجح محور مدار الكوكب عطارد .
جـ ـ ازدياد كتلة الكهروب المتحرك .

٣ ـ تنبأت نظريات اينشتين عن ظواهر لم تكن معروفة قبله :

آ ـ انتقال الخطوط الطيفية في المجال الجاذب .
ب ـ انحراف الشعاع الضوئي بجوار الشمس .
جـ ـ التعادل بين الكتلة والطاقة .

وتوصل اينشتين الى كل ماسبق بواسطة عدد قليل جدا من الفرضيات اتسمت بالعمق والبساطة في آن واحد .

وفي النظرية النسبيـة الخاصة بيّن اينشتين كيف يمكن لناظرين تجمعها شروط خاصة الحصول على قوانين متماثلة لظواهر طبيعية واحدة .
وفي النظرية النسبية العامة كان اينشتين أكثر « ديموقراطية » من ذي قبل ، اذ أثبت أن نتائج النظرية النسبية الخاصة يمكن أن تنطبق على كافة المجربين دون اعتبارات خاصة ، فأدخل لهذه الغاية ما عرف بمبدأ التعادل بين الكتلة العاطلة والكتلة الثقيلة الذي أدى بدوره الى التكافؤ

التام بين المجال الجاذب والحركة المتغيرة • ووضع بعدها نظرية جديدة في الجذبية العالمية كان من نتائجها اعتبار المتصل الزماني ــ المكاني ذي الابعاد الاربعة متصلا لا اوكليديا •

ومكنت هذه الفكرة الجديدة اينشتين من استبدال « مفهوم القوة » بمفهوم « المسالك والممرات في المتصل اللا اوكليدي » •

* * *

الخاتمـة

أعتقد جازما أن الفكر البشري لم ينجب حتى الآن نظرية ثار من حولها ذلك النقاش الحامي الوطيس الذي ثار حول النظرية النسبية .

عارضها كثيرون وتحمس لها كثيرون أيضا وأصبحت النظرية النسبية موضة العصر في عام ١٩٢٠ فور اعلان نتائج البعثة الفلكية الانكليزية التي أتت مؤيدة كل التأييد لها .

عارضها المعارضون بحجة أنها كانت غـير مفهومة وأنها قوضت الاسس الفيزيائية القديمة وقضت على هندسة اوكليدس .

وأهم الحجج التي تذرع بها المعارضون هي أن النظرية النسبية أتت مخالفة « لبادي الرأي » (sens commun) فكان من الاجرام بزعمهم تبديل مفهومي الزمان والمكان السائدين فهبطوا للشارع وانضمـوا للغوغـاء .

« فبادي الرأي » هو الذي يقول لنا أن الارض مسطحة وأنها مركز العالم وهو الـذي ثار على كوبرنيك وغاليله لتأييدهما بدعتي كروية الارض ودورانها حول الشمس .

« وبادي الرأي » أيضا هو الذي علم القدماء أن الحركة لا بد وأن تقف وأن الحركة « الطبيعية » هي الحركة الدائرية المنتظمة ، وهو الذي ثار على قانون العطالة وعلى الفكرة القائلة بالحركة المستقيمة المنتظمة للجسم البعيد عن كل تأثير خارجي .

نجح الانسان الى أبعـد الآفاق في اقامة الاسس الراسخة للعلم وأعطانا درسا عميقا في سلوك الطريق المثلى للتفكير العلمي الصحيح وعلمنا كيف يمكن للفكر البشري أن يحقق انتصاراته العلمية .

وكانت النتيجة بأنه ما من مطلق في العلم ، وقوض اينشتين فكرتي المكان المطلق والزمان المطلق واستبدلهما بمفاهيم قريبة من الفكر السليم

تسودها « ملكة الجيد وتمحيص الحق من الباطل » فكان المكان النسبي والزمان النسبي ، وكل شيء في هذا الكون نسبي •

والظواهر الطبيعية تتأثر الى حد عميــق بحالة الشخص المجرب وهذا ما يجعل النتائج التي يحصل عليها عدد من المشاهدين تابعة لحالتهم ، فكثيرا ما يحصلون على نتائج متباينة حتى في قياساتهم للزمان والاطوال وبالرغم من هذه الاختلافات يحق لمختلف المشاهدين دراسة العالم والاتفاق على قوانينه العامة وصياغتها بشكل متشابه •

والسؤال الآن : هل النظرية النسبية صحيحة ؟ علمتنا فصول هذا الكتاب أن لا ننظر الى نظرية من النظريات من زاويتها المطلقة ، فالجواب الوحيد لهذا السؤال هو :

تفسر النظرية النسبية في الوقت الحاضر عددا أكبر من الظواهر التي فسرتها سابقاتها وتفسرها خير منها جميعا • ولا أفشي سرا اذا قلت بأن هنالك نظريات كثيرة قد تأتي بعد النظرية النسبية وسوف تكون أعم منها وستنجح في النقط التي قد تخفق في تعليلها النظرية النسبية وان لم « يوفق » العلماء حتى اليوم في اكتشاف ظاهرة واحدة أخفقت النظرية النسبية في تعليلها •

والعلم كما بينته فصول هذا الكتاب يتعثر في طريقه غير أنه لا يقع بل يتابع الطريق بعد التعثر بانتظام وبقفزات جبارة ، ولا تكفي جهود عالم واحد أو زمرة من العلماء أو مجهود جيل بكامله أو دولة أو أمة أو حضارة لوضع صرح العلم ، وانما العلم في الحقيقة هو ثمرة جهاد أجيال وأمم وحضارات •

وعلى عاتقنا جميعا تقع مسؤولية الاستمرار في دفع عجلة العلـم نحو القمة علنا نصل أخيرا الى الحقيقة .

وقد لا نصل وهـذا هو الأرجح اذ كلما سدّت ثغرة من ثغرات المعرفة فتحت ثغرات أخرى تحتاج كلها الى تعليل وايضاح .
وبالرغم من ذلك لن تقف قافلة العلم عن مسيرها ولن تأبه بأي نوع من العقبات ...

* * *

المراجع

اسم الكتاب	اسم المؤلف
— Relativity	Albert Einstein.
— Quatre conférences sur la relativité	Albert Einstein.
— Comment je vois le monde	Albert Einstein.
— Conceptions scientifiques, normales et sociales	Albert Einstein.
— One two three . . . infinity	George Gamow.
— M. Tompkins au pays des merveilles	George Gamow.
— Matière et lumière	Louis de Broglie.
— Continu et discontinu	Louis de Broglie.
— Science et méthode..	Henri Poincarré.
— Science et hypothèse	Henri Poincarré.
— Relativity for the layman	James A. Coleman.
— Exposé élémentaire de la théorie d'Einstein	Jean Becquerel.
— Le Principe de la relativité et la théorie d'Einstein	Léon Bloch.
— Pour connaître la relativité	Marcel Boll.
— Les étapes de la mécanique	Marcel Boll.
— Précision sur la relativité	René G. Marchand.
— The A B C of Relativity	Bertrand Russel.
— The Universe of Dr. Einstein ..	Lincoln Barnett.
— Histoire de la mécanique	René Dugas.
— Histoire de la Science	Pierre Rousseau.
— Einstein, sa vie et sa mort	Philippe Frank.

اسم المؤلف	اسم الكتاب
Landan & Rumer.	— What is relativity .. ..
W. Rindler.	— Special Relativity .. ..
Lillian R. Lieber.	— The Einstein theory of relativity
Max Born.	— La théorie de la relativité et ses bases physiques .. ..
Paul Couderec.	— La relativité .. ..
Lucien Fabre.	— Les théories d'Einstein .. .. ..
Enrique Loedel.	— Fisica relativista .. ..
E. Terradasy R. Ortiz.	— Relatividad .. ..
تأليف لنكولن بارنت وترجمة محمد عاطف البرقوقي	العالم واينشتين
الدكتور محمد عبد الرحمن مرحبا	اينشتين ، حياته ، عصره ، نظرياته فلسفته

* * *

فهرس

الموضـوع	الصفحة

* * *

ملتزم الطبع والنشر والتوزيع

دار اليقظة العربية
للتأليف والترجمة والنشر

المطبعة الجديدة ـ دمشق
١٩٦٤